PLANETAS
La enigmática atmósfera de Júpiter

EVOLUCIÓN
Peces que viven en aguas tóxicas

MEDIOAMBIENTE
Nueva estrategia contra las sequías

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Enero 2018 InvestigacionyCiencia.es

...ntific American

¿ES MENSURABLE LA CONSCIENCIA?

Un nuevo método para medir la actividad cerebral podría transformar el cuidado de los pacientes con lesiones cerebrales graves

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

¿ES MENSURABLE LA CONSCIENCIA? | LA ATMÓSFERA DE JÚPITER | ESTRATEGIA CONTRA LAS SEQUÍAS

N.º 496

ENERO 2018



6,90 EUROS

ciclo de
conferencias y debates en

ciencias

FUNDACIÓN RAMÓN ARECES

Por décimo año consecutivo, la Fundación Ramón Areces y Springer Nature, unidos con el objetivo de impulsar la divulgación científica, organizan conjuntamente un ciclo de conferencias y debates en ciencias, abordando cuestiones de actualidad y trasladando a la sociedad innovadores temas científicos y los avances más importantes en estas áreas, tratadas por grandes expertos internacionales.

Con esta iniciativa, la Fundación Ramón Areces y Springer Nature no intentan crear únicamente unas jornadas de debate científico o médico, sino generar una reflexión colectiva sobre materias, que en mayor o menor grado, afectan a toda la sociedad. De esta manera, se pretende presentar estos avances científicos, interpretándolos y traduciéndolos desde la perspectiva de los beneficios y las ventajas que pueden suponer para el bienestar y la calidad de vida de la sociedad, pero también desde sus posibles riesgos e inconvenientes, destacando e incidiendo en la importancia de la investigación en su progreso.

CÉLULAS MADRE Y ORGANOIDES

Desvelando su potencial para avanzar hacia nuevos tratamientos

El desarrollo, hace ahora algo más de 10 años, de estrategias genéticas que permiten ‘reprogramar’ células adultas a células pluripotentes o ‘madre’ ha puesto a disposición de la biomedicina nuevos medios para estudiar y tratar enfermedades. Esta tecnología permite desarrollar modelos celulares de la enfermedad usando células humanas derivadas directamente del paciente y permite avanzar tanto en el conocimiento básico de la enfermedad como en el desarrollo de terapias específicas. Las células reprogramadas también tienen potencial como terapia celular y su uso se está investigando para enfermedades como el Parkinson o enfermedades inmunológicas. En los últimos años, las técnicas de cultivo de células madre (embrionarias, adultas o reprogramadas) se ha refinado hasta permitir el desarrollo de estructuras que asemejan órganos *in vitro*. En la actualidad, se han creado ‘organoides’ similares al intestino, el corazón, el ojo o el cerebro humano que están permitiendo estudiar, tanto los procesos básicos involucrados en el desarrollo de estos órganos, como las disfunciones asociadas a enfermedades del desarrollo.

FUNDACIÓN RAMÓN ARECES
SPRINGER NATURE

CÉLULAS MADRE Y ORGANOIDES

Desvelando su potencial para avanzar hacia nuevos tratamientos

STEM CELLS AND ORGANOIDS

Unlocking their potential to understand and treat disease

MADRID
Jueves, 8 de febrero de 2018 I 17.30 h.

INFORMACIÓN E INSCRIPCIONES
www.fundacionareces.es
C/ Vitruvio, 5 • 28006 Madrid
Metro: República Argentina / Gregorio Marañón
91 515 89 80
Fecha de inscripción:
hasta el 8 de febrero de 2018

Intervenciones

Moderadora
Erika Pastrana
Executive Editor for Nature Research, New York, USA.

Organoides y células madre de hígado y páncreas: Presente y futuro de su utilidad en biomedicina
Dr. Meritxell Huch
Wellcome Trust/Cancer Research UK Gurdon Institute, University of Cambridge, Cambridge, UK.

Utilización de organoides cerebrales para comprender mejor las enfermedades neurológicas
Prof. Guo-Li Ming
Department of Neuroscience, Mahoney Institute for Neurosciences, Perelman School for Medicine, University of Pennsylvania, Philadelphia, USA.

Implicaciones terapéuticas de las células madre del cáncer
Prof. Cédric Blanpain
WELBIO, Laboratory of Stem Cells and Cancer, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium.

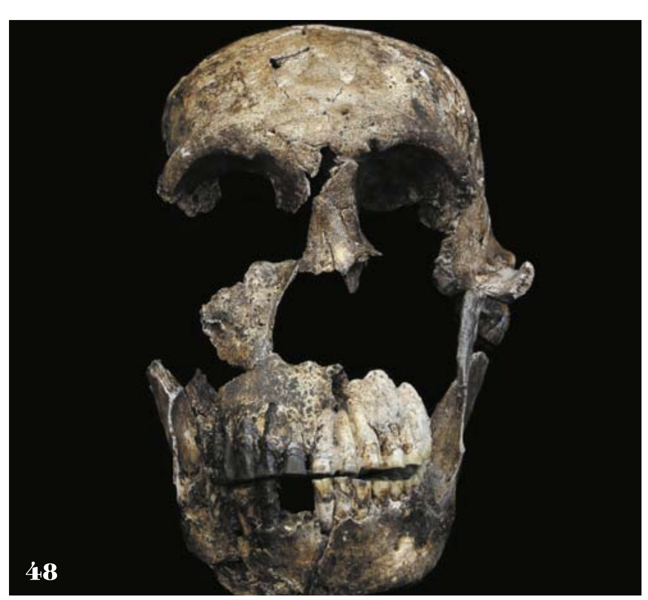
Senescencia y reprogramación: Una visión integradora de la reparación tisular
Dr. Manuel Serrano
Cellular Plasticity and Disease Group, Institute for Research in Biomedicine (IRB), Barcelona, Spain.



ARTÍCULOS

NASA/ESA/HARALD EBELING-UNIVERSIDAD DE HAWÁI/JEAN-PAUL KNEIB (LAM)


8


48


92

© ISTOCKPHOTO/CATHYKEIFER (*camaleón*)

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

¿Cómo puede saberse si una persona que ha sufrido una lesión cerebral grave sigue manteniendo la consciencia? Esta es la pregunta que se plantean médicos y familiares de los afectados cuando deben decidir sobre las opciones de tratamiento de los pacientes que no responden ni a preguntas ni a otros estímulos durante largos períodos de tiempo. Ahora, una técnica que permite determinar la presencia o ausencia de actividad consciente en el cerebro tal vez ofrezca soluciones. Imagen de Ashley Mackenzie.



redaccion@investigacionyciencia.es



Octubre 2017

DIÁLOGO INTERIOR

He encontrado interesante el artículo «Hablar consigo mismo» [por Charles Fernyhough; Investigación y Ciencia, octubre de 2017]. Sobre todo, como bien dice el autor, por lo poco que se ha escrito sobre ello. Al respecto, me gustaría saber su opinión sobre dos cuestiones relacionadas.

La primera tiene que ver con la meditación. Esta práctica intenta acallar nuestra voz interna para ver el mundo de un modo nuevo, de forma más objetiva, intentando entender todos los puntos de vista y siendo compasivo. Existen estudios de actividad cerebral realizados en personas que están meditando. ¿Podemos comparar estas investigaciones con las del habla interna y extraer alguna relación?

Por otro lado, mi impresión es que la voz interior estaría ahí para afianzar más nuestra personalidad y puntos de vista; nuestra forma de ver las cosas. Así, estoy de acuerdo en que la creatividad está relacionada con el hablar consigo mismo, dado que toda forma de arte o invención, sobre todo en su forma de surgir, constituye algo bastante personal. Sin embargo, también se deberían estudiar aquellos casos en los que una concepción equivocada se retroalimenta gracias a esa voz interna (como podría ser el caso de fanáticos, asesinos, dictadores...), sus posibles consecuencias y peligros, así como formas de evitarla. ¿Hay algún estudio al respecto?

Gorka Isasi
Bilbao

El artículo de Fernyhough menciona estudios neurológicos en personas que mantienen un diálogo interior. Me gustaría saber si se han llevado a cabo investigaciones similares para determinar si el habla interna se da también en individuos que sufren demencia o alzhéimer, o si acaso está presente de alguna otra forma. Mi suegra solía permanecer sentada e inmóvil durante horas sin poder dirigirnos una palabra; siempre me he preguntado si al menos podría hablar consigo misma.

Sandra Robbins
Carlsbad, California

Quisiera saber si algunas de las rutas cerebrales que se han identificado en la investigación sobre el habla interior se hallan relacionadas con el sueño. Parece que el sueño podría ser una recreación visual incontrolada de imágenes almacenadas con anterioridad.

Lanny Schroeder

«Existen estudios de actividad cerebral realizados en personas que están meditando. ¿Podemos comparar estas investigaciones con las del habla interna y extraer alguna relación?»

—Gorka Isasi, Bilbao

Responde Fernyhough: *Sobre las observaciones de Isasi, la meditación plantea varias cuestiones interesantes sobre si es posible o no silenciar nuestra corriente de conversación interna. Primero, es importante señalar que no todo el mundo usa el habla interior, por lo que detener su flujo puede resultar más fácil para unas personas que para otras. El problema con el empleo de escáneres cerebrales para averiguar qué ocurre en la experiencia subjetiva de una persona es el de la «inferencia inversa»: solo porque una región concreta del cerebro se encuentre activa, no podemos concluir que un individuo esté experimentando una cosa en lugar de otra.*

En cuanto a la segunda cuestión, existen de hecho varios vínculos interesantes entre el habla interior, la creatividad y el concepto que un individuo tiene de sí mismo (este asunto se trata con mayor extensión en mi libro The voices within, *Basic Books, 2016). La manera en que el habla interior podría reforzar ideas negativas ha sido examinada hace poco en el artículo de Mattea Kramer «The Donald Trump inside your own head», publicado en* The Nation *en octubre de 2017 (www.thenation.com/article/the-donald-trump-inside-your-own-head).*

Con respecto a la pregunta de Robbins, merece la pena indicar que el habla interior resulta difícil de estudiar. En el caso de individuos con demencia, el problema de obtener informes fiables sobre su experiencia personal resulta aún más agudo. Considero posible que el habla interna continúe dándose en personas que, por razones que pueden incluir la demencia, no se comunican en exceso. Una posible vía para investigarlo consistiría en desarrollar mediciones no verbales del fenómeno, como representaciones pictóricas de algunos aspectos del habla interior.

En respuesta a Schroeder, el sueño ocurre principalmente —aunque no solo— durante la fase de «movimiento rápido de ojos» (REM), cuando la actividad en la corteza cerebral se asemeja a la de una persona despierta. Desde un punto de vista metodológico, relacionar sueños concretos ligados al habla con la activación de rutas cerebrales vinculadas al lenguaje se antoja extremadamente difícil. Tal vez podrían obtenerse autoevaluaciones detalladas de los sujetos adaptando las los métodos de la técnica conocida como «muestreo de experiencias». Pero lograr que esa estrategia funcione con un participante dormido —al que quizá se le despierta de manera repentina y se le invita a informar sobre su sueño— parece bastante complicado.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



LAS COLISIONES de estrellas de neutrones (*recreación artística*) generan radiación electromagnética y ondas gravitacionales. En agosto de 2017, los astrónomos detectaron por primera vez ambos tipos de señales.

ASTRONOMÍA

Multimensajeros cósmicos

La capacidad de ver, «oír» e incluso «degustar» sucesos astronómicos extremos promete convertirse en el próximo gran avance en astronomía

Con un resplandor en el cielo, el pasado 17 de agosto nacía una nueva era en astronomía. Aquel día el telescopio espacial Fermi detectó un estallido de rayos gamma originado por el choque y posterior fusión de dos estrellas de neutrones, objetos extraordinariamente densos que se forman tras la explosión de algunas estrellas muy masivas. Sin embargo, la radiación gamma no fue lo único que observaron los astrónomos. Con pocos segundos de diferencia, las perturbaciones del espaciotiempo generadas por el mismo fenómeno habían llegado a los interferómetros LIGO, en EE.UU., y Virgo, en Italia, como si de un trueno y un relámpago se tratase.

Tales perturbaciones reciben el nombre de ondas gravitacionales y, metafóricamente, puede decirse que registrarlas se parece más a «oír» que a ver el suceso. A partir de las propiedades de la señal, los astrónomos determinaron que la fuente se encontraba a unos 130 millones de años luz de la Tierra. Poco después de la detección, miles de científicos en distintas partes del mundo se coordinaron para estudiar las secuelas del fenómeno a lo largo de todo el espectro electromagnético, desde la radiación gamma hasta las ondas de radio, pasando por los rayos X, el ultravioleta, el visible y el infrarrojo.

Los resultados merecieron la pena. Las observaciones revelaron que el cataclismo había generado elementos más pesados que el hierro, lo que confirmaba la teoría de que las colisiones de estrellas de neutrones son una fuente cósmica de oro y otros materiales preciosos. A medida que se detecten y estudien más de estas fusiones, su censo colectivo podría servir para entender mejor la física de estos objetos, cadáveres es-

ILUSTRACIÓN DE ROBIN DIENEL, CORTESÍA DE LA INSTITUCIÓN CARNEGIE DE LA CIENCIA

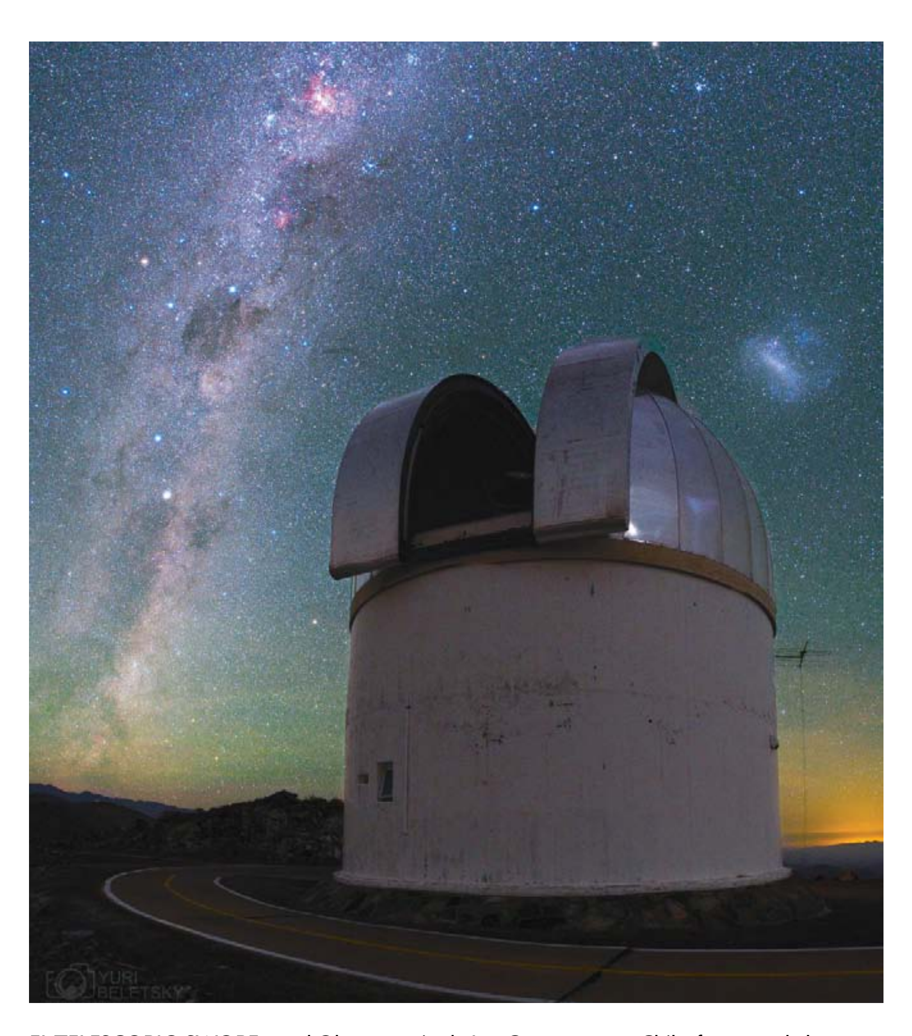
telares del tamaño de una ciudad pero casi tan densos como un agujero negro. Además, la intensidad de la señal gravitatoria permite determinar la distancia a la fuente, lo que, combinado con las observaciones electromagnéticas, hace posible obtener una estimación independiente de la tasa de expansión del universo. A la postre, ello podría servir para desentrañar la naturaleza de la energía oscura, el misterioso agente que, según se cree, causa que el universo se expanda a una velocidad cada vez mayor.

Con todo, la recompensa científica pudo haber sido aún más cuantiosa. El observatorio IceCube, en la Antártida, intentó detectar los neutrinos que debieron generarse en la colisión, si bien no halló ninguno. Lo más probable es que fuesen emitidos en un haz que no pasó por la Tierra, explica Francis Halzen, científico principal de IceCube. Si detectar luz y ondas gravitacionales puede compararse a ver y oír el fenómeno, registrar los neutrinos emitidos habría sido como «degustarlo».

Los expertos llaman «astronomía de multimensajeros» a este tipo de observaciones múltiples en las que la señal puede estar compuesta por radiación electromagnética, ondas gravitacionales o partículas subatómicas. Esto ya ocurrió en 1987, cuando los astrónomos detectaron la luz y los neutrinos emitidos por una explosión de supernova acontecida en una de las pequeñas galaxias satélite de la Vía Láctea. Sin embargo, solo ahora han podido registrarse las ondas gravitacionales asociadas, algo posible gracias a los interferómetros LIGO y Virgo. La astronomía de multimensajeros constituye en muchos sentidos uno de los sueños más fabulosos de los investigadores, aunque obligará a vérselas con una descomunal cantidad de datos procedentes de observatorios dispares.

«Hemos de repensar cómo nos enfrentamos a esto porque puede que pronto veamos un suceso como esta fusión de estrellas de neutrones una vez al mes o incluso a la semana», asegura Vicky Kalogera, astrónoma de la Universidad de Noroeste de EE.UU. y miembro destacada de la colaboración LIGO. «Este invadió la vida de la gente. Todos lo dejamos todo, les dijimos a nuestras familias e hijos que no volverían a vernos hasta que se anunciaran los resultados.» Es posible que las fusiones empiecen a aparecer con tanta frecuencia, añade Kalogera, que la mayoría no se estudiarán con tanto detalle.

IceCube ya ha puesto en marcha otra campaña mundial de seguimiento con multimensajeros, esta vez para estudiar el origen de un neutrino de alta energía detectado el pasado 22 de septiembre. Los primeros resultados sugieren que la partícula provenía del disco de acreción de un agujero negro supermasivo situado en el centro de una galaxia a más de mil millones de años luz de distancia. Para Halzen, ello tal vez indique que estos «núcleos galácticos activos» constituyan la fuente más probable de la mayoría de los rayos cósmicos y neutrinos de alta energía que surcan el universo. «Puede que estemos en la recta final para descubrir el origen de los rayos cósmicos, que han sido un misterio para la astronomía desde hace más de un siglo», apunta el investigador.



EL TELESCOPIO SWOPE, en el Observatorio de Las Campanas, en Chile, fue unos de los que el pasado agosto observaron la fusión de dos estrellas de neutrones.

CORTESÍA DE YURI BELLETSKY

Ya hay varios telescopios dedicados a la investigación de las alertas emitidas por LIGO, Virgo y IceCube. Sin embargo, su potencial se quedará pequeño en comparación con el del futuro Gran Telescopio para Rastreos Sinópticos (LSST), un observatorio con un espejo de 8,4 metros de diámetro que en 2022 comenzará un sondeo de diez años. El instrumento, que cartografiará toda la bóveda celeste cada pocos días desde su atalaya en una cumbre chilena, podría llegar a ser clave en el rastreo óptico de los sucesos detectados por LIGO, Virgo o IceCube. Aunque «no si aparecen diez cada noche. ¡Eso arruinaría nuestro sondeo!», exclama Tony Tyson, científico jefe del LSST. Establecer con precisión la fuente electromagnética de una onda gravitatoria o de una señal de neutrinos requerirá horas de tiempo de observación y la criba de teraoctetos de datos en bruto, explica el investigador.

La mayoría de los astrónomos, sin embargo, coincide en que lo que promete este campo excede con mucho los inconvenientes. «Muy raras veces se alcanza una frontera de este tipo en astronomía», afirma Abraham Loeb, astrofísico de Harvard que ha trabajado durante largo tiempo en métodos de multimensajeros. «Casi parece que la naturaleza ha sido demasiado amable con nosotros.»

—Lee Billings

MEDICINA

Reprogramar, restaurar y regenerar

Una innovadora técnica repara los tejidos mediante infusiones de ADN

La posibilidad de convertir o reprogramar las células en otros tipos distintos ha renovado las esperanzas de regenerar las extremidades y los órganos dañados. Con todo, los métodos existentes son arriesgados o ineficaces y solo se han ensayado en animales de laboratorio. Una nueva técnica podría solventar esas limitaciones. Sus creadores la han usado para reparar las patas lesionadas de ratones y reivindican que la estrategia es lo bastante segura para ser puesta a prueba en humanos.

Las células se reprograman habitualmente con mezclas de ADN, ARN y proteínas. El método más común emplea un virus como vehículo, si bien este puede infectar células indeseadas, provocar la respuesta del sistema inmunitario o incluso transformar las células en cancerosas. Una alternativa, denominada electroporación generalizada, expone células enteras a un campo eléctrico que abre orificios en sus membranas por los que pueden penetrar el material genético y las proteínas. Pero este método puede estresar o matar las células, y solo un pequeño porcentaje de ellas acaba convertido en el tipo de célula deseado.

La nanotransfección tisular, descrita en un estudio publicado en octubre en *Nature Nanotechnology*, consta de un chip que alberga una matriz de canales diminutos que aplican campos eléctricos a células aisladas. «Solo se altera una pequeña fracción de la superficie celular, en comparación con el método clásico, que actúa sobre la célula entera», afirma uno de los autores del estudio, L. James Lee, ingeniero químico y biomolecular de la Universidad Estatal de Ohio. «Básicamente, creamos un orificio minúsculo a través del cual inyectamos sin más el ADN en la célula, con lo que podemos controlar la dosis.»

Chandan Sen, fisiólogo de esa misma universidad, y sus colaboradores elaboraron un cóctel genético que convierte rápidamente las células cutáneas en células endoteliales, componentes principales de los vasos sanguíneos. A continuación, aplicaron su técnica a ratones cuyas extremidades habían sido dañadas por el corte de una arteria que las dejaba sin riego sanguíneo. Surgieron nuevos vasos, el riego sanguíneo aumentó y al cabo de tres semanas la extremidad había sanado por completo.

Además, las células transformadas segregaron aparentemente materiales de reprogramación en vesículas extracelulares (VE) que penetraron hasta las capas profundas del tejido. La inyección a los ratones de las VE recogidas en la piel de otros congéneres tratados resultó tan eficaz como el uso del chip. Los investigadores convirtieron asimismo células cutáneas de los ratones en células similares a neuronas y las trasplantaron en los cerebros de ratones dañados por un ictus, con lo que los animales mejoraron su función mental. «Según la prueba preliminar de eficacia, esta [estrategia] resulta impecable», afirma el neurobiólogo Benedikt Berninger, de la Universidad Johannes Gutenberg de Maguncia, que no ha participado en el estudio. «La gran pregunta es: ¿Conseguiremos que [las VE] conviertan solo células concretas?»

El equipo espera iniciar los ensayos en humanos este mismo año. «A la luz de las posibilidades que vislumbramos, podría suponer un avance trascendental», afirma Sen.

—Simon Makin

BIOLOGÍA

¿Trigo sin gluten?

Mediante la edición genética puede obtenerse un cereal más seguro para los celíacos

Un panecillo recién horneado es tan placentero como una nube etérea y vaporosa en un día de verano. La textura apetitosa del pan se debe, en gran parte, al gluten, un grupo de proteínas que se encuentran en el trigo, el centeno y la cebada. Pero en las personas con celiaquía, un trastorno autoinmunitario grave, el gluten ataca al intestino delgado. Muchas otras presentan una intolerancia más moderada al gluten y evitan los alimentos que lo contienen.

Para la elaboración de pan sin gluten suelen emplearse harinas de otra procedencia, como las de arroz o patata, por lo que el producto resultante tiene un sabor y un aspecto diferentes al pan de trigo. Pero, en la actualidad, se ha descubierto una estrategia de ingeniería genética que permite que el trigo contenga mucha menos cantidad del tipo de gluten más dañino, pero que a la vez conserve otras proteínas que otorgan al pan su sabor y elasticidad característicos.

Los cultivos modificados genéticamente son objeto de un intenso debate en todo el mundo, y en algunos países, como Francia y Alemania, no están legalizados. En palabras de Francisco Barro, biotecnólogo vegetal del Instituto de Agricultura Sostenible del CSIC, en Córdoba, la principal preocupación tiene que ver con la inserción del ADN de una especie en otra. Para evitar este método, Barro y sus colaboradores utilizan la técnica CRISPR/Cas9, que permite realizar un corte en determinados genes del trigo.

En sus estudios, estos investigadores se han centrado en las gliadinas α, proteínas del gluten que se consideran las principales responsables del trastorno inmunitario provocado por el trigo. Han creado pequeños fragmentos de material genético del cereal, los cuales dirigen la proteína Cas9 (que actúa como unas «tijeras moleculares») para que corte 35 de los 45 genes de la gliadina α. El trigo modificado produjo en el laboratorio una respuesta inmunitaria hasta un 85 por ciento menor, según la información facilitada el pasado mes de septiembre en la versión en línea de la revista *Plant Biotechnology Journal*.

Wendy Harwood, genetista vegetal del Centro John Innes, en Inglaterra, ajena al estudio, sostiene que el trigo modificado ha de cumplir una serie de pasos antes de su comercialización. «No creo que hayamos llegado al final de la historia», comenta. «Se trata solo de un avance muy importante para la obtención de un producto que puede llegar a ser de gran utilidad». Para desarrollar una cepa de trigo totalmente segura para las personas celíacas, tal vez tenga que actuarse sobre un mayor número de genes del gluten. Barro afirma que ya están trabajando en este sentido.

—Yasemin Saplakoglu

THOMAS FUCHS

EVOLUCIÓN

Los seres más inteligentes del mar

El complejo comportamiento social de ballenas y delfines se relaciona con su voluminoso cerebro

Las orcas disponen de dialectos específicos de grupo, los cachalotes se cuidan de las crías de sus semejantes y los delfines mulares cooperan con otras especies. Según un reciente estudio publicado en *Nature Ecology and Evolution*, estas habilidades sociales guardan una estrecha relación con el tamaño cerebral de los animales.

Hace casi treinta años, los científicos propusieron por primera vez la existencia de un vínculo entre la vida social y la expansión del cerebro, o encefalización, al observar que las especies de primates con mayor masa cerebral vivían, por lo general, en grupos más grandes. Más tarde, esta teoría se amplió para asociar el tamaño del cerebro a otras características sociales, como la resolución de conflictos y la distribución de los alimentos.

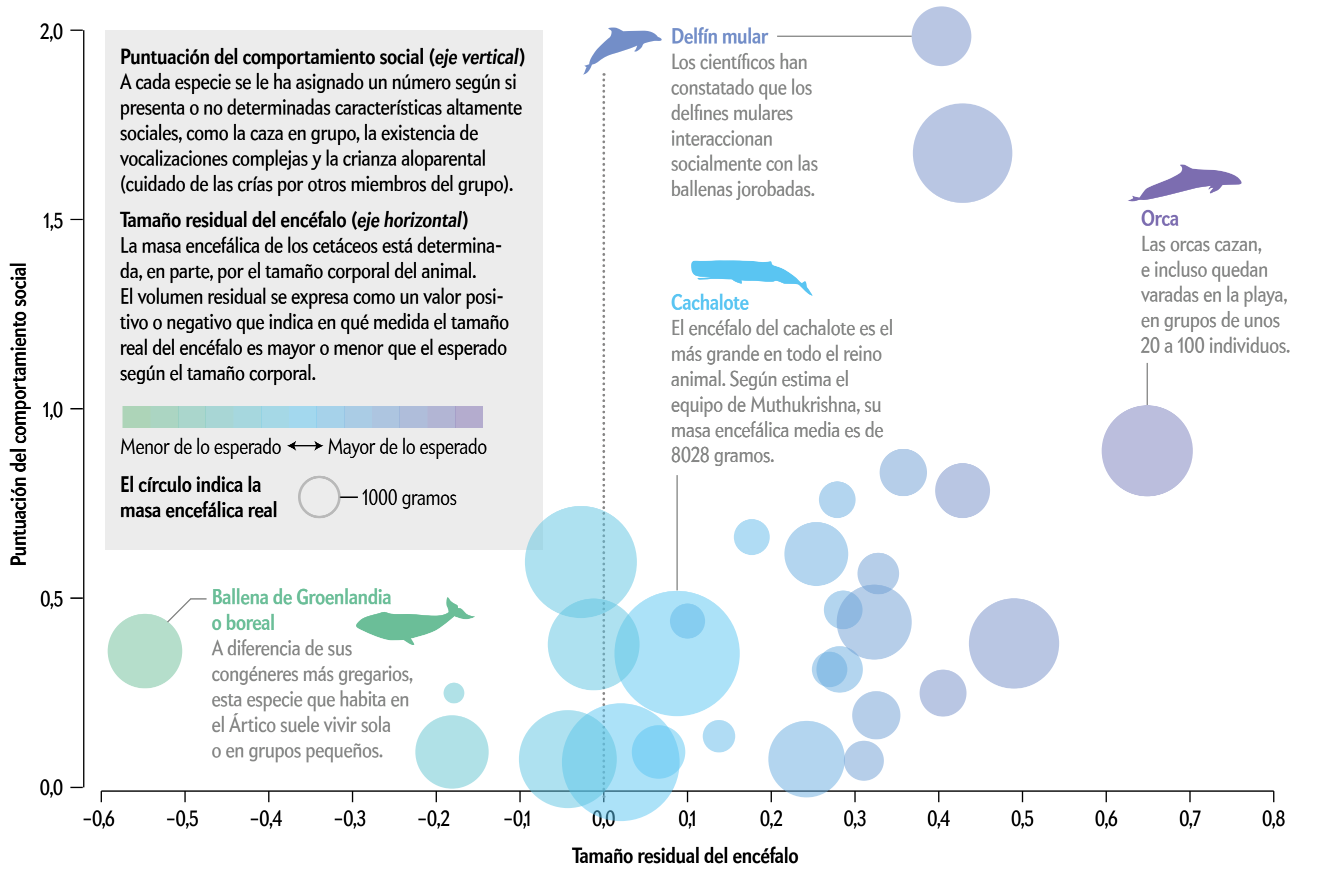
Michael Muthukrishna, especialista en psicología económica de la Escuela de Economía de Londres, y sus colaboradores buscaron un vínculo similar entre el volumen del encéfalo y la sociabilidad de los cetáceos, el orden de mamíferos que incluye a las ballenas, los delfines y las marsopas. Recabaron datos sobre la masa encefálica y corporal de los cetáceos, el tamaño del grupo y el comportamiento social. Analizaron un total de 90 especies de cetáceos y observaron que la variable que mejor predecía el tamaño del encéfalo era un índice que tiene en cuenta diversas características sociales, como la cooperación con otras especies, la caza en grupo y la existencia de vocalizaciones complejas. El encéfalo más grande también se asociaba a otros factores, como la riqueza de la dieta y el ámbito geográfico.

Según los autores, estos resultados concuerdan con la teoría de que los cetáceos desarrollaron un cerebro voluminoso para enfrentarse a los retos de la vida en entornos sociales con mucha información. Pero Robert Barton, biólogo evolutivo de la Universidad de Durham que no participó en el estudio, recomienda cautela a la hora de extraer conclusiones sobre causalidad en los análisis de correlación. También subraya la importancia de examinar regiones cerebrales específicas que podrían evolucionar de manera distinta. Su propio equipo ha observado, por ejemplo, que el cerebro de los primates nocturnos desarrolla estructuras olfativas de mayor tamaño que las de especies activas durante el día.

Para Muthukrishna, la principal limitación de su estudio es que no se dispone de suficiente información sobre numerosas especies de cetáceos. Y añade que conocer más datos de las ballenas y los delfines podría revelar que otros factores, como la esperanza de vida y la duración de la etapa juvenil, también pueden influir en el tamaño del cerebro.

Comprender cómo los cetáceos desarrollaron un cerebro de gran tamaño nos podría ayudar, en último término, a reunir las piezas de nuestra propia historia evolutiva. Como estos animales ocupan un ambiente completamente diferente al de las personas, Muthukrishna afirma que «constituyen un grupo de control útil para comprobar hipótesis sobre la evolución humana».

—*Diana Kwon*



FUENTE: «THE SOCIAL AND CULTURAL ROOTS OF WHALE AND DOLPHIN BRAINS», POR KIERAN C. R. FOX ET AL. EN *NATURE ECOLOGY & EVOLUTION*, 16 DE OCTUBRE DE 2017; AMANDA MONTAÑEZ

SOSTENIBILIDAD

El precio ambiental del oro peruano

La minería ilegal en la selva tropical de Madre de Dios ha aumentado a un ritmo asombroso

Los mineros de oro llevan décadas devastando la selva amazónica peruana de Madre de Dios en busca del preciado metal. Ahora, un estudio ha revelado que la minería ilegal está experimentando un fuerte auge a pesar de los esfuerzos del Gobierno del país para detenerla, lo que está causando graves perjuicios al ecosistema.

En 2012, el Gobierno peruano anunció una serie de medidas para proteger de los mineros la selva Madre de Dios, considerada la capital de la biodiversidad del país. Las autoridades efectuaron batidas, desmantelaron campos clandestinos y regularon el tráfico de combustible y suministros. A pesar de ello, en los últimos cuatro años el área total explotada ha aumentado cerca de un 40 por ciento, casi 70.000 hectáreas. De acuerdo con los análisis más exhaustivos efectuados hasta ahora, la práctica —posiblemente facilitada por un escaso control sobre la región y un mejor acceso por carretera— se amplió a al menos una de las dos reservas nacionales de la selva, espacios protegidos donde la minería está prohibida.

La extracción del oro de las rocas puede contaminar el entorno con facilidad. Las actividades mineras ilegales emplean a menudo mercurio líquido, un producto muy tóxico que puede infiltrarse en el suelo y liberarse en forma de vapores nocivos. Pero las consecuencias van más allá de las del proceso de extracción: los mineros suelen deforestar miles de hectáreas con maquinaria pesada, lo que arruina el entorno.

«Se pueden ver dragadoras retirando limo del río y se pueden oír sus motores», comenta Raúl Tupayachi, biólogo peruano del Instituto Carnegie para la Ciencia y coautor del estudio. «Esperábamos que nuestros datos mostraran un descenso en la velocidad de deforestación tras las acciones del Gobierno», afirma. «Pero hemos visto que, a la larga, no han tenido gran repercusión.»

Tras analizar imágenes por satélite tomadas entre 1999 y 2016, el estudio, que fue publicado en agosto en *Environmental Research Letters*, halló un declive inicial en la deforestación tras la acción emprendida por el Gobierno en 2012. En 2013, sin embargo, se aceleró la pérdida de área forestal. En los años siguientes aparecieron nuevas minas que invadieron áreas protegidas, como la Reserva Nacional Tambopata, hogar de los pueblos indígenas ese'ejja, quechua y aymara, así como de coloridos guacamayos, nutrias gigantes y jaguares. Hacia 2016, las operaciones mineras habían devastado al menos 520 hectáreas de los bosques de la reserva.

William Llactayo, ingeniero geográfico del Ministerio del Ambiente peruano, que no participó en el trabajo, apunta que el estudio llega en un momento crítico, ya que, de continuar la minería, «muchas de esas áreas quedarán degradadas [irreversiblemente] en los próximos años».

—*Emiliano Rodríguez Mega*





EN JULIO DE 2015, Perú eliminó decenas de campamentos destinados a la minería ilegal de oro en La Pampa, en Madre de Dios, donde se han destruido cientos de miles de hectáreas de selva tropical.

SEBASTIAN CASTANEDA, GETTY IMAGES

COMPUTACIÓN

¿Más cerca de los ordenadores cuánticos?

Dos nuevos diseños de qubits podrían allanar el camino hacia la computación cuántica funcional

Se cree que los ordenadores cuánticos superarán con creces a los ordinarios en la resolución de varios problemas importantes. Sin embargo, su construcción se enfrenta a un obstáculo de primer orden: las unidades computacionales básicas, los bits cuánticos, o qubits, son frágiles y difíciles de controlar, y el calor y otros factores ambientales los corrompen con facilidad. Ahora, dos propuestas recientes podrían ayudar a solventar tales inconvenientes.

Los bits tradicionales representan, o bien un uno, o bien un cero. Un solo qubit, sin embargo, puede incorporar ambos valores a la vez, algo posible gracias al principio de superposición cuántica. Según este, una partícula como el electrón puede quedar descrita por una combinación simultánea de dos o más estados (por ejemplo, su espín, o sentido de giro intrínseco, puede apuntar «hacia arriba», «hacia abajo», o corresponder a una mezcla de ambas orientaciones). Los qubits constan de superposiciones de ese tipo en un sistema con dos estados principales. Otra propiedad cuántica de interés en computación es el entrelazamiento, el cual permite que las propiedades de dos partículas distantes permanezcan coordinadas aunque una y otra no puedan comunicarse. En principio, un ordenador cuántico de 300 qubits podría abarcar más combinaciones de estados que átomos hay en el universo observable.

Hoy por hoy, los qubits basados en el espín de una partícula deben estar separados por una distancia no mayor de unos 15 nanómetros, ya que en caso contrario el entrelazamiento se pierde. En un trabajo reciente, Andrea Morello, de la Universidad de Nueva Gales del Sur, y sus colaboradores afirman haber diseñado un qubit que permite separaciones de hasta 500 nanómetros, lo que deja un margen mucho mayor para controlarlos. Para crear uno de estos qubits, apodados «biestables» (*flip-flop*) por los autores, es necesario separar ligeramente un electrón de su núcleo atómico. Ello genera una polaridad en el átomo, lo que permite que este pueda interaccionar con otros similares a una distancia mayor de lo habitual. Los resultados fueron publicados el pasado mes de septiembre en *Nature Communications*.

El segundo diseño de qubit se basa en el concepto de cuasipartícula, o partícula efectiva: las excitaciones cuánticas que describen el comportamiento colectivo de los electrones en un material. En un trabajo publicado en agosto en *Nature*, investigadores de la Universidad Técnica de Delft y de la de Eindhoven presentaron un esquema para llevar a cabo el «trenzado» de cuasipartículas (*quantum braiding*); es decir, para intercambiar sus posiciones. En estos casos, la distancia entre ellas disminuye la probabilidad de que los efectos ambientales degraden ambas a la vez, lo que en principio dota de mayor estabilidad a los qubits asociados, explica Hao Zhang, físico cuántico de Delft y uno de los autores principales del estudio.

Ambos equipos esperan poder crear pronto versiones operativas de los nuevos qubits. «Creo que es muy emocionante que los científicos sigan ensayando nuevas rutas para construir ordenadores cuánticos a gran escala», asegura Seth Lloyd, experto en computación cuántica del Instituto de Tecnología de Massachusetts que no participó en ninguno de los dos trabajos.

—*Charles Q. Choi*

«Creo que es muy emocionante que los científicos sigan ensayando nuevas rutas para construir ordenadores cuánticos a gran escala»

—Seth Lloyd, Instituto de Tecnología de Massachusetts

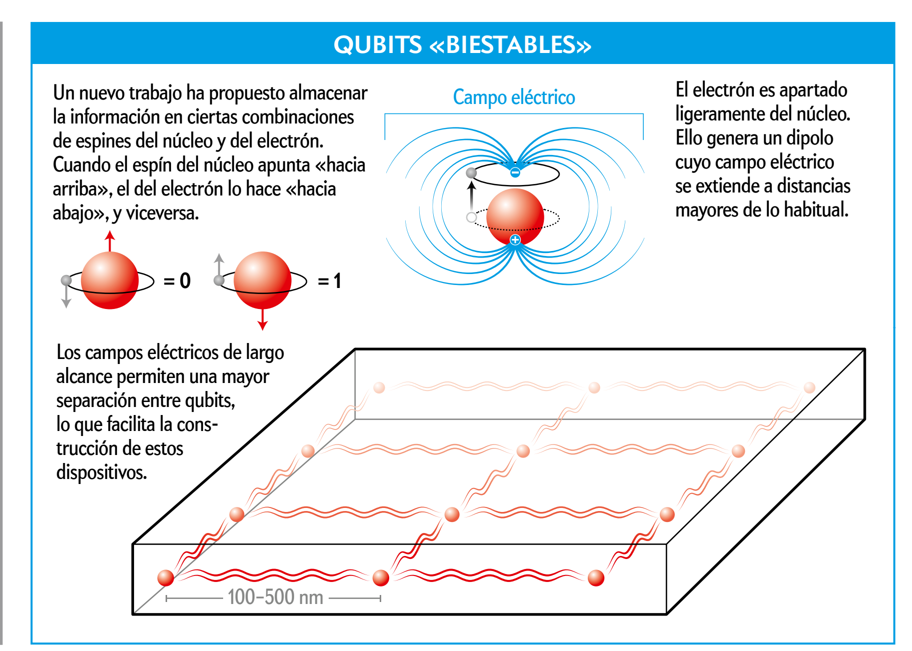
QUBITS TRADICIONALES

En los diseños habituales de computación cuántica, los datos suelen almacenarse en el estado de espín de un electrón o un núcleo atómico.

Electrón · Núcleo · Espín «hacia arriba» · = 0 · = 1 · Espín «hacia abajo»

Estas unidades básicas de información, denominadas qubits, pueden quedar enlazadas magnéticamente solo si los átomos se encuentran separados por una distancia no mayor de 15 nanómetros.

Chip de silicio · Qubits ligados · 15 nm



BROWN BIRD DESIGN; FUENTE: «SILICON QUANTUM PROCESSOR WITH ROBUST LONG-DISTANCE QUBIT COUPLINGS», GUILHERME TOSI ET AL., *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 8, ART. 450, 6 DE SEPTIEMBRE DE 2017

MATERIALES

El problema del cobalto

La escasez del metal podría dificultar la expansión de los vehículos eléctricos

El auge de los coches eléctricos se acerca con rapidez: los analistas económicos predicen que, hacia 2040, un tercio de todos los automóviles podrían ser de este tipo. La mayoría de estos vehículos dependen de grandes baterías de iones de litio, lo que despierta la incertidumbre sobre la continuidad del suministro mundial del metal. Sin embargo, según un estudio publicado el pasado mes de octubre en la revista *Joule*, hay un elemento que suscita una preocupación mayor: el cobalto.

«Los mejores cátodos de las baterías de litio contienen cobalto, y su producción es limitada», afirma Elsa Olivetti, científica de materiales e ingeniera del Instituto de Tecnología de Massachusetts y autora principal del estudio. Olivetti y sus colaboradores calcularon qué ocurriría con el suministro de cobalto si los vehículos eléctricos se tornasen tan populares como se espera, y sus resultados no son alentadores.

El cátodo de las baterías de litio contiene una combinación de cobalto y otros metales. Las singulares propiedades atómicas de este elemento permiten que el cátodo almacene una gran cantidad de energía en poco espacio y ayudan a mantener su estructura laminar.

Olivetti y sus colaboradores extrapolaron el suministro de litio y cobalto hasta 2024. Para calcular la demanda, supusieron dos situaciones basadas en un crecimiento rápido y lento del uso de baterías para vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos portátiles. Probablemente, el litio no se convertirá en un factor limitante a largo plazo. Pero, aun con una previsión moderada de ventas de 10 millones de vehículos eléctricos en 2025, la demanda de cobalto en ese año podría alcanzar 330.000 toneladas, mientras que la cantidad disponible no pasaría de 290.000.

El cobalto es un subproducto de la minería de cobre y níquel, de modo que su producción depende de la demanda de esos metales. Además, más de la mitad del cobalto del planeta se halla en la inestable República Democrática del Congo.

Reciclar baterías de litio es complicado y apenas se lleva a cabo. Pero incluso con mayores tasas de reciclado y procesos más económicos, «el reciclaje no tendrá un impacto significativo hasta diez o más años después de la introducción en masa de los vehículos eléctricos», afirma Linda Gaines, analista de sistemas de transporte del Laboratorio Nacional Argonne, en EE.UU., que no participó en el estudio.

Sin embargo, el diseño de nuevos cátodos ofrece algunas esperanzas. Según Gaines, varios prototipos recientes con alto contenido en níquel reducirían la demanda de cobalto. También se están desarrollando cátodos sin cobalto que los investigadores esperan hacer funcionales pronto.

—Prachi Patel



EL COBALTO resulta esencial para las baterías de los vehículos eléctricos y de los dispositivos electrónicos portátiles.

COLE BURSTON, GETTY IMAGES *(cobalto)*; COSMOCAIXA *(dinosaurio)*

AGENDA

CONFERENCIAS

9 de enero
La química en CSI: Drogas, veneno, sangre y gore
Ricard Boqué, Universidad Rovira i Virgili
Café La Cantonada
Tarragona
agenda.urv.cat

18 de enero
La búsqueda de vida en el universo
Charles Cockell, Universidad de Edimburgo
Ciudad de las Artes y las Ciencias
Valencia
www.cac.es

EXPOSICIONES

Hasta el 7 de enero
Belén botánico: Las plantas y el ser humano, un viaje común
Real Jardín Botánico de Córdoba
Córdoba
www.jardinbotanicodecordoba.com

Hasta el 14 de enero
La vida oculta del agua
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es

Trix, el tiranosaurio mejor conservado del mundo
CosmoCaixa
Barcelona
agenda.obrasocial.lacaixa.es



¿Juegas? ¡Pensamos en energía!
Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
La Coruña
www.muncyt.es

OTROS

22 de enero — Debate
Inteligencia artificial
Nuria Oliver, Vodafone
Ramon López de Mántaras, CSIC
Fundación Juan March
Madrid
www.march.es

MATERIALES

La química y la física, felizmente unidas

Un gran avance en la teoría cuántica de los sólidos permite identificar los materiales topológicos conocidos e incluso predecir la existencia de otros nuevos

GREGORY A. FIETE



EN LOS ÚLTIMOS AÑOS se ha constatado que el comportamiento de un material puede depender fuertemente de las propiedades topológicas de la función de onda de los electrones. Ahora, una teoría que conjuga la física y la química de los sólidos ha permitido estudiar este sorprendente fenómeno desde una nueva perspectiva.

Numerosas tecnologías relacionadas con la informática, la comunicación o con sensores de todo tipo requieren conocer cómo se mueven los electrones a través de un material. Todos los campos de la ciencia, muchos sectores de la economía e incluso ciertas tareas gubernamentales dependen cada día de ellas. Pero, a pesar de que llevamos más de ochenta años investigando la teoría cuántica de los electrones en los sólidos, nuestro conocimiento sigue lleno de lagunas. En un estudio que fue portada en julio del año pasado en *Nature* y que constituye todo un salto conceptual, una colaboración internacional en la que han participado Luis Elcoro, Mois I. Aroyo y Maia García Vergniory, de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), presenta una nueva teoría que combina aspectos de la química y la física de los materiales. Su trabajo no solo mejora nuestra comprensión de los sólidos conocidos, sino que puede emplearse para identificar nuevos materiales con propiedades electrónicas aún por descubrir.

Las teorías físicas modernas se basan en leyes de conservación, las cuales imponen fuertes restricciones sobre la estructura matemática de cualquier modelo. Dos de las más célebres son la ley de conservación de la energía y la de conservación del momento. Sin embargo, un aspecto tal vez menos conocido sea el origen de dichas leyes: la simetría. La conservación del momento, por ejemplo, es consecuencia directa de la simetría frente a traslaciones; es decir, del hecho de que la física de un sistema permanezca invariante cuando nos desplazamos a lo largo de una dirección determinada.

En un cristal, en el que los átomos se disponen en una red regular y periódica, el aspecto del sistema continúa inalterado solo cuando la magnitud del desplazamiento coincide con un múltiplo entero del espaciado de la red. Como resultado de esta simetría de traslación «imperfecta», tiene lugar una conservación del momento también imperfecta. La componente conservada se conoce como cuasimomento, o momento cristalino, y constituye la cantidad natural para caracterizar el estado cuántico de un electrón.

Física y estructura de bandas

La relación entre la energía de un electrón y su cuasimomento se conoce como estructura de bandas electrónicas. Desde los años cuarenta del pasado siglo se han desarrollado potentes herramientas teóricas para calcular la estructura de bandas de un material. Esta información puede emplearse para determinar si nos encontramos ante un metal o un aislante, cómo funcionará el material en un transistor (los diminutos componentes que sirven de base a la electrónica moderna) o cómo responderá ante la luz (una propiedad cla-

ve en las aplicaciones ópticas, como las células solares).

El concepto de estructura electrónica de bandas ha gobernado la física de materiales desde hace décadas. Sin embargo, en los primeros años de este siglo se constató que dos aislantes con estructuras de bandas muy similares podían resultar totalmente distintos desde el punto de vista de las funciones de onda cuánticas que describen la distribución de los electrones. Tales diferencias pueden cambiar por completo el comportamiento de los electrones en la superficie del material, y se hallan íntimamente relacionadas con las propiedades topológicas de los estados electrónicos. Aquel hallazgo dio lugar al nacimiento de un nuevo campo de investigación: el de los materiales topológicos. Los trabajos pioneros que, ya en los años setenta y ochenta del siglo pasado, abrieron la puerta a tales logros fueron reconocidos en 2016 con la concesión del premio Nobel de física.

Las propiedades de la mayoría de los materiales topológicos conocidos presentan un alto grado de inmunidad frente a imperfecciones y defectos. Además, es posible usar un campo eléctrico para controlar el flujo de los electrones en función de su espín, lo que ha inspirado no pocas propuestas sobre sus posibles aplicaciones. Como consecuencia de todo ello, el descubrimiento de nuevos materiales topológicos reviste gran interés para la comunidad científica. El procedimiento habitual para identificarlos consiste en calcular la estructura de bandas de un material, encontrar los estados electrónicos e introducir esta información en una fórmula que revelará si el material es topológico o no.

Química y orbitales

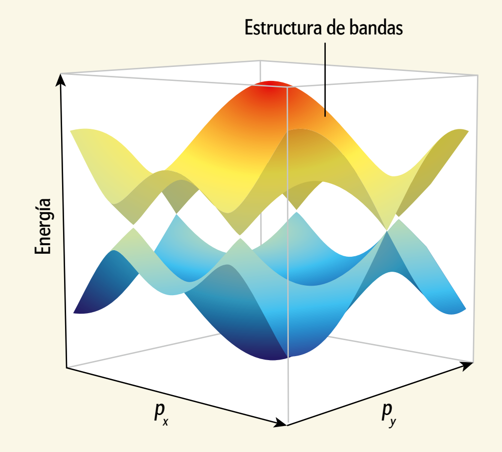
Mientras que los físicos se centran en el movimiento de los electrones, los químicos suelen pensar en términos de orbitales atómicos, los cuales describen la posición de un electrón en torno a un núcleo. Ello se debe a que los sistemas estudiados por los químicos suelen tener menos átomos y menos simetrías que los analizados por los físicos. Además, el concepto de orbital se presta a describir de manera natural el enlace químico.

Una de las ideas más célebres de la mecánica cuántica, el principio de incertidumbre de Heisenberg, establece que, cuanto mejor conozcamos la posición de un objeto, menos sabremos acerca de su movimiento, y viceversa. Así pues, formular una teoría de los materiales basada tanto en el punto de vista químico (la posición de los electrones) como en el físico (su movimiento) requiere no poca gimnasia mental y matemática. Eso es justamente lo que han logrado los investigadores de la UPV/EHU y sus colaboradores.

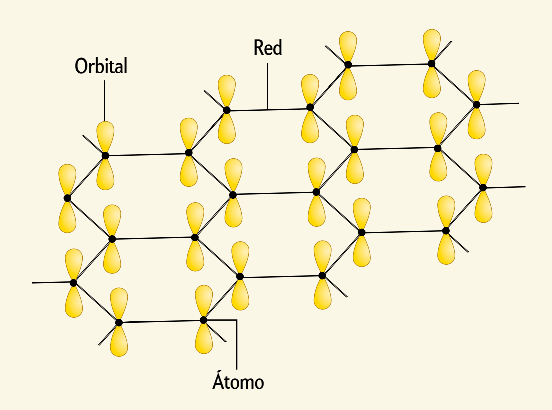
La teoría propuesta por los autores proporciona un método para predecir y descubrir experimentalmente materiales topológicos. El trabajo aprovecha las bases de datos de los materiales conocidos y permite realizar búsquedas automáticas a gran escala, las cuales ya han servido para encontrar cientos de posibles materiales topológicos cuya existencia no habría sido fácil de presagiar por otros métodos. Por ejemplo, los autores hallan que el subóxido de plomo (Pb_2O), cuyas propiedades

DOS REPRESENTACIONES DE UN MATERIAL

UN TRABAJO RECIENTE ha combinado los dos puntos de vista usados tradicionalmente para describir un material: el empleado por los físicos, basado en la estructura electrónica de bandas (*izquierda*), y el habitual en química, centrado en el concepto de orbital atómico (*derecha*). Este esquema ilustra ambas descripciones en el caso del grafeno, un material cristalino formado por una sola capa de átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal.



Estructura de bandas: La descripción física de los materiales se basa en la manera en que se mueven los electrones. Ello queda plasmado en la estructura de bandas: la relación entre los posibles valores que puede tomar la energía de un electrón en función de su momento. Las dos componentes del momento se denotan aquí mediante p_x y p_y. Las superficies superior e inferior corresponden, respectivamente, a la banda de conducción y a la de valencia.



Orbitales atómicos: Los químicos suelen centrarse en la posición que ocupan los electrones en torno al núcleo atómico, una cualidad que se presta con naturalidad a describir el enlace químico. La región física del espacio en la que resulta posible encontrar un electrón recibe el nombre de orbital atómico.

topológicas no habían sido estudiadas hasta la fecha, debería comportarse como un aislante topológico una vez sometido a tensiones mecánicas. Los investigadores también son capaces de vaticinar la existencia de semimetales, materiales con propiedades intermedias entre las de los metales y los no metales. Además de su capacidad predictiva, la teoría proporciona una nueva perspectiva sobre los estados topológicos que complementa y amplía las anteriores.

Retos futuros

A pesar de sus grandes logros, el marco teórico de este estudio no aborda las complejidades características de los estados topológicos fuertemente correlacionados, que a menudo se sitúan más allá de las descripciones basadas en orbitales o en la estructura de bandas. Los sistemas fuertemente correlacionados revisten gran interés, ya que pueden presentar excitaciones «emergentes» útiles en computación cuántica, así como dar lugar a formas exóticas de magnetismo y superconductividad.

Debido a las limitaciones teóricas y computacionales vigentes, las correlaciones electrónicas seguirán planteando retos en el futuro previsible. Los sistemas cuánticos fuertemente correlacionados se hallan en la frontera de la investigación actual —con independencia de si la topología es relevante o no— y tocan cuestiones que van mucho más allá de la ciencia de materiales, como la física nuclear o las propiedades de las estrellas de neutrones. El progreso en el estudio de estos sistemas podría ayudarnos, por tanto, a revelar nuevos detalles sobre el propio universo.

Gregory A. Fiete *trabaja en el Departamento de Física de la Universidad de Texas en Austin.*

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 547, págs. 287-288, 2017. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2017

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

The birth of topological insulators. Joel E. Moore en *Nature*, vol. 464, págs. 194-198, marzo de 2010.
Topological quantum chemistry. Barry Bradlyn et al. en *Nature*, vol. 547, págs. 298-305, julio de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Aislantes topológicos. David Carpentier y Laurent Lévy en *IyC*, agosto de 2015.
La materia cuántica, vista desde la quinta dimensión. Karl Landsteiner en *IyC*, septiembre de 2017.

TERAPIA GÉNICA

Regeneración de la piel con células madre transgénicas

El tratamiento de un paciente que padecía una enfermedad genética incurable demuestra la eficacia, la viabilidad y la seguridad de regenerar casi toda la piel con células madre corregidas genéticamente

MARIACELESTE ARAGONA Y CÉDRIC BLANPAIN

El tratamiento con células madre y la terapia génica suelen considerarse el futuro de la medicina, pero su puesta en práctica ha tropezado con numerosos obstáculos. De hecho, existen pocos ejemplos de terapias con células madre humanas de verdadera utilidad. Sin embargo, el pasado mes de noviembre, un equipo dirigido por Michele de Luca, de la Universidad de Módena y Reggio Emilia, describió en *Nature* un logro en este campo: el empleo de la terapia génica para reparar las células de un niño que padecía una grave enfermedad genética, la epidermólisis ampollosa. Esta causa ampollas y úlceras en la piel parecidas a las que se producen en las quemaduras, y se la conoce también como enfermedad de la piel de mariposa o de la piel de cristal.

La piel se compone de la epidermis, que actúa como barrera frente al medio externo, y la dermis, que confiere elasticidad y resistencia mecánica, y sobre ella se ancla firmemente la epidermis. En la epidermólisis ampollosa, ciertas mutaciones genéticas impiden la resistencia o el anclaje epidérmicos normales, con lo que la piel se vuelve frágil. La tensión mecánica o las pequeñas lesiones provocan que la epidermis se fragmente o se desprenda de la dermis, lo que da lugar a ampollas y úlceras. Se producen heridas crónicas, dolorosas e intratables, que, con el tiempo, derivan en cáncer de piel, infecciones y, en ocasiones, la muerte. En la actualidad la enfermedad no tiene cura.

El grupo de De Luca ya había empleado en 2006 la terapia génica para tratar una forma leve de epidermólisis ampollosa causada por mutaciones del gen *LAMB3*, que codifica la laminina β3, una proteína de anclaje epidérmico. En aquella ocasión, los autores aislaron un pequeño fragmento de epidermis de un paciente e incorporaron una versión normal de *LAMB3* a las células epidérmicas aisladas. Introdujeron el gen en el núcleo de estas mediante un vector retrovírico, el cual, tras integrarse en el genoma de cada célula, posibilitó la expresión normal de *LAMB3*. El equipo cultivó in vitro las células corregidas genéticamente hasta obtener un fragmento mayor de epidermis, que trasplantaron a la pierna del paciente, donde prendió.

Ahora, De Luca y sus colaboradores han llevado esta estrategia mucho más lejos. Un niño de siete años que padecía una forma muy grave de epidermólisis ampollosa debida a mutaciones de *LAMB3* ingresó en el hospital en una situación de riesgo vital, al haber perdido casi toda la piel. Los autores tomaron una biopsia cutánea de 4 centímetros cuadrados de una zona no afectada, modificaron genéticamente las células



EN LA PIEL NORMAL, la epidermis (*rosa oscuro*) se ancla firmemente en la dermis subyacente (*rosa claro*) y confiere protección frente al exterior. En la enfermedad de la piel de mariposa, la epidermis ha perdido esas propiedades debido a una mutación genética.

WIKIPEDIA/DOMINIO PÚBLICO

mediante un vector retrovírico portador de *LAMB3* y cultivaron la población de células reparadas hasta obtener 0,85 metros cuadrados de injertos epidérmicos transgénicos. En tres operaciones distintas, sustituyeron el 80 por ciento de la piel del paciente por los injertos. Al cabo de 21 meses de seguimiento, el niño parecía haberse curado por completo. No presentaba ampollas y la piel mostraba resistencia a la tensión y había cicatrizado con normalidad.

Seguridad de la técnica

Una posible complicación de la terapia génica es la de alterar genes esenciales o provocar la sobreexpresión de genes que regulan el desarrollo de tumores, ya que el vector se integra en posiciones aleatorias del genoma. Para investigar esta posibilidad, los autores secuenciaron el ADN de la piel corregida genéticamente y observaron que la mayoría de las integraciones se habían producido en secuencias que no codifican proteínas. Los genes en los que se habían incorporado los vectores retrovíricos, por lo que se sabe, no guardan relación directa con la oncogénesis, de forma que la técnica puede considerarse segura.

A continuación, compararon los patrones de integración del vector en los cultivos modificados in vitro con los de la epidermis regenerada in vivo, para determinar si ciertos patrones (por ejemplo, la integración en secuencias promotoras que controlan la expresión génica) se asociaban a una ventaja de supervivencia celular que predispusiera a padecer un cáncer en el futuro. Encontraron patrones parecidos en ambas situaciones, lo cual indica que ni el protocolo de cultivo ni el recambio epidérmico natural favorecen la supervivencia y la expansión de un subgrupo de células en particular. Por último, la seguridad de la técnica se vio reafirmada al no observarse signos de autoanticuerpos contra el transgén, que comportarían el rechazo del injerto.

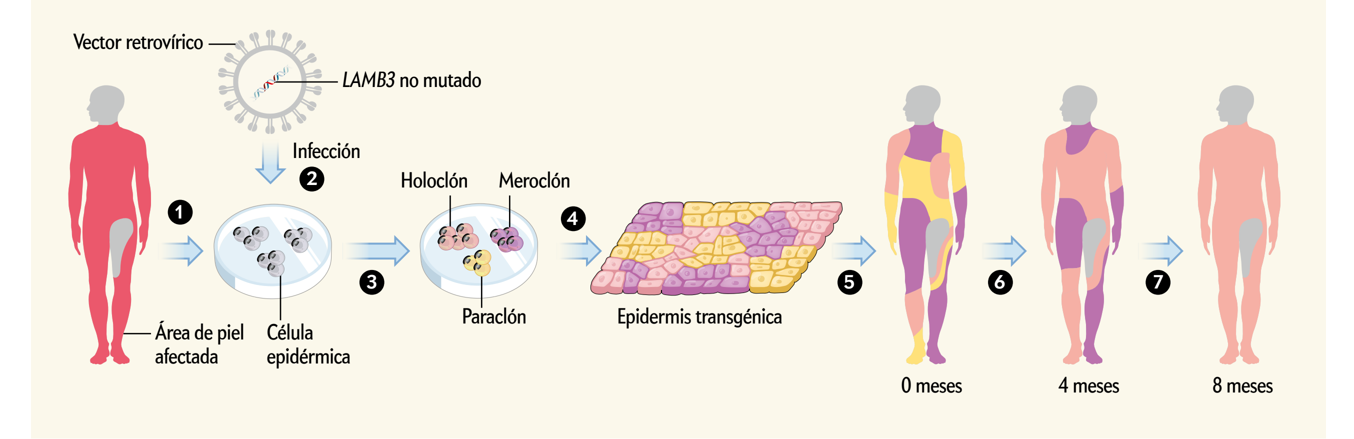
Origen de las células reparadoras

La epidermis tarda cerca de un mes en renovarse por completo. Sigue debatiéndose si la renovación depende de unas células madre que se hallan en la cúspide de una jerarquía celular o si todas las células proliferativas actúan como progenitoras equipotentes, que eligen al azar entre proliferar o diferenciarse. Cuando se cultivan células epidérmicas in vitro se obtienen tres tipos de colonias: holoclones, paraclones y meroclones. Los holoclones son colonias proliferativas de células indiferenciadas con capacidad de autorrenovarse; los paraclones son células diferenciadas que tienen poca capacidad de renovación; y los meroclones constituyen una forma intermedia entre las otras dos. Se ha planteado que los holoclones contienen células madre epidérmicas, pero no se ha podido demostrar formalmente.

El equipo de De Luca cartografió las posiciones del genoma de los holoclones donde se había integrado el vector vírico

TERAPIA GÉNICA PARA UNA ENFERMEDAD CUTÁNEA

LA TÉCNICA SE HA EMPLEADO para tratar a un niño que había perdido el 80 por ciento de la piel debido a la epidermólisis ampollosa, una enfermedad que provoca lesiones en la piel debido a una mutación del gen *LAMB3*. Primero se aislaron células epidérmicas de una región de la piel sin ampollas ❶ y se corrigieron las células infectándolas con un retrovirus portador del gen *LAMB3* no mutado ❷. El cultivo in vitro de las células epidérmicas produce tres tipos de colonias: holoclones, que son proliferativos y contienen células madre; colonias diferenciadas de paraclones; y meroclones, que presentan un estado intermedio de diferenciación ❸. El cultivo posterior de estas células produce epidermis transgénica derivada de estas colonias ❹, la cual puede trasplantarse de nuevo al paciente ❺. La piel se regenera por completo una vez al mes, con el consiguiente reemplazo de las células diferenciadas. Después de cuatro meses, numerosas colonias de paraclones y meroclones del trasplante inicial se habían perdido ❻ y, a los ocho meses, casi toda la piel se derivaba de los holoclones iniciales ❼, de lo se deduce que la piel es mantenida por unas pocas células madre.



y las comparó con las de las células cutáneas del niño donde el vector se conservaba a los cuatro y ocho meses del trasplante: en las células obtenidas mediante biopsia a los cuatro meses había muchos menos lugares de integración del vector que en el cultivo inicial, mientras que entre los cuatro y los ocho meses se observaba una gran cantidad de ellos. Estos datos parecen indicar que durante los primeros cuatro meses se pierde la mayoría de las células presentes en el cultivo inicial y que es un conjunto reducido de células madre el que contribuye a la reposición de la epidermis a largo plazo.

Por otro lado, a medida que la piel se regeneraba, aparecieron con mayor frecuencia las posiciones de integración propias de los holoclones in vitro (esta piel no solamente contenía holoclones, sino también paraclones y meroclones de formación reciente); es decir, los holoclones contienen células madre que repueblan la piel regenerada. Al cabo de ocho meses, casi toda la epidermis derivaba de holoclones. Todo parece indicar, pues, que la epidermis humana se sustenta en una pequeña cantidad de células madre muy longevas.

El estudio realizado por el equipo de De Luca demuestra la viabilidad y seguridad de sustituir toda la epidermis con una técnica mixta que combina la terapia génica y las células madre, además de arrojar luz sobre la jerarquía celular que regula el recambio epidérmico en los seres humanos. No obstante, hay varios aspectos que deben tenerse en cuenta antes de aplicar el tratamiento a otros pacientes.

La epidermólisis ampollosa puede estar causada por mutaciones en distintos genes, y no todas serán fáciles de corregir; es posible que para algunas hagan falta estrategias como la edición genética con CRISPR-Cas9. También habrá que adaptar el procedimiento a diferentes regiones anatómicas, sobre todo en los pacientes con enfermedades cutáneas menos graves. Asimismo, es posible que el tratamiento resulte más eficaz en la población infantil, ya que, en comparación con los adultos, las células madre de los niños poseen mayor capacidad de renovación y hay menos piel que sustituir.

Por último, conviene esperar a conocer la evolución del niño del estudio y de otros pacientes para comprobar la ausencia de consecuencias adversas, como neoplasias cutáneas o alteraciones que silencien la expresión del transgén en algunas células y comporten la reaparición de lesiones en determinadas zonas. Sea como sea, este trabajo representa un adelanto importantísimo en la investigación sobre las aplicaciones terapéuticas de las células madre.

***Mariaceleste Aragona** y **Cédric Blanpain** son investigadores del Laboratorio de Células Madre y Cáncer de la Universidad Libre de Bruselas.*

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 551, págs. 306-307, 2017. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2017

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Correction of junctional epidermolysis bullosa by transplantation of genetically modified epidermal stem cells. Fulvio Mavilio et al. en *Nature Medicine*, vol. 12, págs. 1397-1402, diciembre de 2006.

Regeneration of the entire human epidermis using transgenic stem cells. Tobias Hirsch et al. en *Nature*, vol. 551, págs. 327-332, noviembre de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Terapia génica, segunda parte. Ricki Lewis en *IyC*, mayo de 2014.

NEUROCIENCIA

¿ES MENSURABLE LA CONSCIENCIA?

La aplicación de impulsos magnéticos sobre el cerebro simultaneada con la medición de su actividad eléctrica parece ser un modo fiable de detectar la consciencia

Christof Koch



E MUERTO MULTITUD DE VECES. CADA NOCHE, CUANDO TUMBO MI AGOTADO ser para que repose, mi consciencia se extingue. Sumido en un sueño inconexo con el mundo exterior, no experimento nada dentro de mi cuerpo durmiente hasta que mi consciencia resurge por la mañana, de vuelta al mundo que despierta.

EN SÍNTESIS

Aun teniendo a su disposición imágenes diagnósticas del cerebro, un médico puede tener dificultades para decidir si un paciente con daño cerebral grave es consciente de lo que le rodea.

Una técnica que resolviera esta carencia podría, en principio, determinar si el paciente está profundamente dormido, está anestesiado o ha perdido la consciencia a causa de una lesión cerebral.

Durante los últimos años, el desarrollo de lo que podría llamarse un «medidor de la consciencia» podría poner al alcance de los profesionales dispositivos fiables de esa índole.

Médicos y familiares podrían así tomar decisiones sobre el cuidado de miles de pacientes que son incapaces de comunicar sus deseos y necesidades.





Christof Koch es director científico y presidente del Instituto Allen de Neurociencia, en Seattle. Es miembro del consejo de asesores de *Scientific American*.

La vida cotidiana está llena de ese tipo de experiencias. Durante mi infancia, me extirparon el apéndice y me anestesiaron; apagaron mi consciencia y, al acabar la operación, la restauraron. Un recuerdo vago de mi adolescencia me sitúa en el asiento trasero de un Renault que recorre una avenida de tres carriles en el norte de África. De improviso, el escenario cambia súbitamente. Estoy en la misma calle, pero ahora veo todo cabeza abajo. Habíamos colisionado contra un árbol; salí despedido y quedé inconsciente sobre los adoquines.

Muchos lectores conservarán recuerdos similares de pérdida y recuperación de la consciencia. Estamos habituados al ciclo diario de despertar, dormir y soñar. Pero esa experiencia no es la misma para todo el mundo. Para algunos pacientes con traumatismo cerebral, la consciencia se esfuma durante días, semanas o incluso más.

En su quehacer cotidiano, un médico puede tener dificultades para saber si alguien duerme serenamente, permanece anestesiado o sufre un daño cerebral grave. Una persona que yace con los ojos abiertos ¿está experimentando algo, sea lo que sea, o su mente consciente ha abandonado el cuerpo y no hay nadie en casa? Sería estupendo contar con una técnica que midiera la consciencia y diera respuesta a esas preguntas. A primera vista, la idea de un equivalente al manguito medidor de la presión arterial podría parecer absurda, pero los avances acaecidos en los últimos años han suscitado expectativas reales sobre detectores que cumplan los requisitos para ser medidores de la consciencia, artefactos que serían útiles en medicina e investigación para determinar si una persona conserva la consciencia, por mínima que sea, o no. Esa facultad ayudaría a médicos y familiares a tomar decisiones relativas al cuidado de miles de enfermos imposibilitados de toda comunicación.

EL REGISTRO DE LAS ONDAS CEREBRALES

Contemplar la posibilidad de un medidor de la consciencia pasa por considerar la dinámica interna de nuestra vida mental, actividad que surge y se desvanece en fracciones de segundo, lo que impone medir esas fluctuantes señales cerebrales a una escala temporal similar. La principal herramienta fisiológica para inferir el estado consciente mediante la exploración del cerebro ha sido, y sigue siendo, el electroencefalograma (EEG).

El EEG es una creación del psiquiatra alemán Hans Berger, que dedicó su vida a desvelar la relación entre la actividad cerebral objetiva y los fenómenos subjetivos. Fue el primero en registrar las ondas cerebrales de un paciente en 1924, pero, asaltado por las dudas, no publicó sus descubrimientos hasta 1929. El resto es historia, puesto que el EEG se convirtió en la herramienta fundacional de toda una disciplina médica como es la neurofisiología clínica, aunque Berger nunca obtuvo ningún reconocimiento digno en la Alemania nazi y se ahorcó en 1941, pese a haber sido nominado para el premio Nobel en repetidas ocasiones.

Hay, por supuesto, otras maneras de registrar la actividad cerebral, además del venerable EEG. Las más comunes miden la dinámica del riego sanguíneo en el seno del cerebro mediante la resonancia magnética o registran el campo magnético alrededor de él por medio de la magnetoencefalografía (MEG). Pero esos instrumentos, al igual que otras técnicas más recientes, como la espectroscopía del infrarrojo cercano, acarrean problemas metodológicos y prácticos que impiden por el momento su uso rutinario en la práctica médica.

El EEG mide las diminutas fluctuaciones de voltaje (de 10 a 100 microvoltios) generadas por la actividad eléctrica de la corteza cerebral, la superficie externa encargada de la percepción, la acción, la memoria y el pensamiento. Las principales artífices de las señales captadas por el EEG, cuya actividad eléctrica colectiva se hace tangible a través del mecanismo de conducción de volumen, son las neuronas piramidales, así llamadas por su forma tetraédrica. La contribución de regiones más profundas, como el tálamo, se deduce de manera indirecta a través de su acción sobre las neuronas corticales. La técnica funciona mediante la colocación de electrodos sobre el cuero cabelludo, sin una operación quirúrgica cruenta que trepane el cráneo. Con la difusión de los electroencefalógrafos de alta densidad —provistos de hasta 256 electrodos— se han generalizado los mapas que muestran la distribución de la actividad eléctrica en todo el cerebro.

Aun así, colocar los electrodos con su gel conductor y húmedo sobre la piel del cráneo resulta engorroso, lento y propenso a error si los electrodos se mueven, inconvenientes a tener en cuenta. Con los actuales electrodos secos más sensibles, el EEG ha pasado de ser un aparato médico a un dispositivo apto para el consumidor con el que someterse a una sesión de biorretroalimentación durante horas, que permite a los atletas o a los «*hackers* cerebrales» caseros concentrar sus pensamientos o a los insomnes monitorizar, profundizar y alargar el sueño natural.

Desde finales de los años cuarenta del siglo pasado, la detección de una señal de «actividad» en el EEG fue el signo más seguro de tener ante sí a una persona consciente. Este estado se caracteriza por ondas de bajo voltaje que fluctúan con rapidez y que están desfasadas en lugar de estar organizadas secuencialmente a lo largo del cráneo. En general, conforme el EEG se desplaza hacia frecuencias más bajas, disminuye la probabilidad de que la consciencia esté presente. Sin embargo, hay demasiadas excepciones a dicha regla como para que sirva de fundamento general para el diagnóstico del estado de inconsciencia. Por eso, científicos y médicos han buscado nuevos métodos fiables hasta dar con uno basado en una propiedad fundamental de toda experiencia consciente.

EN EL INFRAMUNDO

Antes de llegar a ese punto, paremos a pensar por qué los médicos se preocupan por detectar la consciencia en dos colectivos

PÁGINA ANTERIOR: ASHLEY MACKENZIE

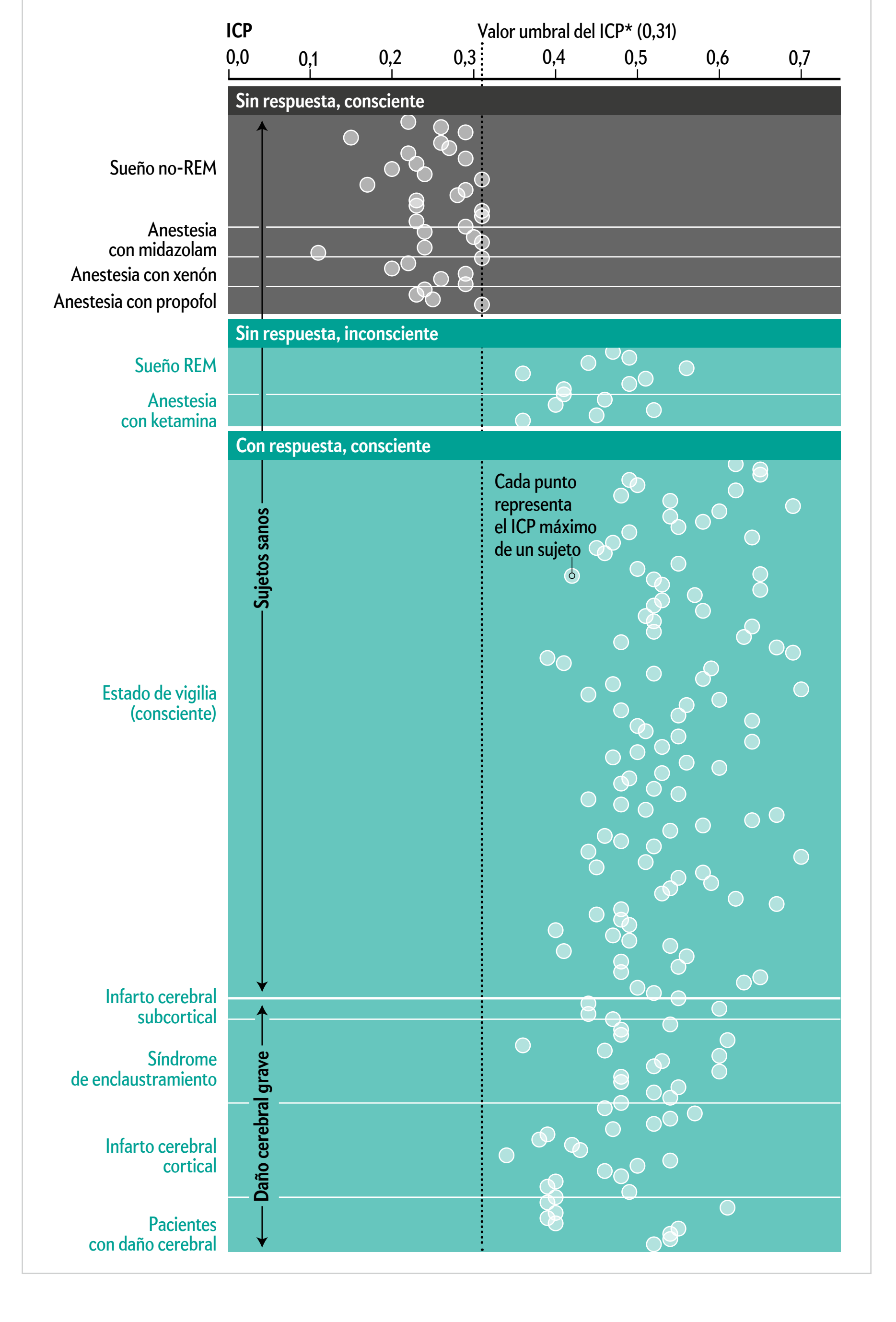
de pacientes (mención aparte de los pacientes pediátricos, que suponen una problemática diferente que no abordaremos aquí). El primero es el de los adultos con trastornos graves de la consciencia causados por traumatismos cerebrales, infecciones del cerebro (encefalitis) o de sus membranas protectoras (meningitis), infartos o intoxicaciones por drogas o alcohol. Tras sobrevivir al primer daño, el enfermo permanece estable pero inválido o postrado en cama, incapaz de hablar o de expresar sus pensamientos o intenciones. Con los debidos cuidados de enfermería para evitar las úlceras de decúbito y las infecciones, este tipo de pacientes pueden vivir largos años.

En este primer colectivo, los médicos distinguen categorías. Los pacientes en estado vegetativo, mejor descrito por el término carente de sentido peyorativo «síndrome de vigilia sin respuesta» (SVSR), entran y salen del estado de sueño. Sin embargo, fracasa todo intento de establecer una forma de comunicación básica: «Si me oye, apriete mi mano o mueva los ojos». El paciente con SVRS traga saliva, bosteza y abre y mueve los ojos o la cabeza, pero aparentemente sin ninguna intencionalidad. No ejecuta acciones voluntarias; solo conserva reflejos del tronco encefálico, que controla procesos básicos, como la respiración, las transiciones entre el sueño y la vigilia, el ritmo cardíaco, los movimientos oculares y las respuestas de la pupila. Terri Schiavo es un nombre que muchos recuerdan: una paciente de Florida que, tras sufrir un paro cardíaco, fue reanimada y mantenida en SVRS durante 15 años hasta que, en 2005, se le indujo la muerte médicamente. El paciente con SVRS es un fenómeno moderno cuya supervivencia depende de la diligencia del teléfono de emergencias, de la rapidez del traslado al hospital y de los cuidados avanzados allí recibidos. Solo en Estados Unidos hay más de 10.000 personas en ese estado, alojadas en centros para enfermos terminales o en residencias, o bien en su casa. Si bien los indicios aportados por el comportamiento concuerdan con la noción de que los pacientes con SVRS no experimentan nada, conviene recordar que la «ausencia de pruebas no prueba la ausencia» y que hay que conceder a los afectados el beneficio de la duda. Existe una zona gris de diagnóstico en la que caen estos pacientes y en la que

UN BAREMO PARA LA CONSCIENCIA

La prueba «zap y zip»

En búsqueda de un método con el que evaluar la consciencia, Silvia Casarotto, de la Universidad de Milán, y sus colaboradores reclutaron 102 sujetos sanos y 48 pacientes con daño cerebral pero despiertos y capaces de responder. Se aplicaron impulsos magnéticos (estimulación magnética transcraneal) sobre su cerebro en estado consciente e inconsciente —de ahí el «zap»—. La actividad cerebral se detectó con un EEG y se analizó mediante un algoritmo de compresión de datos —de ahí el «zip»—. A partir de los EEG, se calculó un valor conocido como el índice de complejidad de perturbación (ICP, por sus siglas en inglés), y se preguntó a los participantes por su estado mental. Se determinó que una persona consciente exhibía al menos un valor superior a 0,31 (ICP*), mientras que los sujetos inconscientes mostraban puntuaciones más bajas. Con este valor, se sometió al test «zap y zip» a pacientes con trastornos graves de la consciencia (*resultados no mostrados*), que detectó algunos individuos que parecían estar conscientes.



FUENTE: «STRATIFICATION OF UNRESPONSIVE PATIENTS BY AN INDEPENDENTLY VALIDATED INDEX OF BRAIN COMPLEXITY», POR SILVIA CASAROTTO ET AL., EN *ANNALS OF NEUROLOGY*, VOL. 80, N.º 5; NOVIEMBRE DE 2016; AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*)

nos preguntamos si su cerebro leso será capaz de experimentar dolor, sufrimiento, ansiedad, aislamiento, resignación silenciosa, un torrente de pensamientos, o quizá simplemente nada. Algunos estudios han sugerido que el 20 por ciento permanecen conscientes y que, por lo tanto, han sido diagnosticados erróneamente. Para la familia y los amigos, quienes a veces tienen que ocuparse del ser querido durante años, saber si está mentalmente ahí puede suponer una diferencia fundamental.

La situación es menos ambigua para los pacientes con estado de mínima consciencia (EMC). Incapaces de hablar, pueden hacer señas, pero a menudo de manera ocasional, mínima y errática; sonríen o lloran en ciertas situaciones emocionales, vocalizan o gesticulan en ocasiones, o siguen con la mirada objetos llamativos. Se supone que experimentan algo, por mínimo que sea, al menos durante parte del tiempo.

La necesidad de monitorizar la consciencia también resulta evidente en un segundo colectivo de pacientes completamente distinto, cuyo cerebro funciona con normalidad: personas como usted y como yo que se someten a una operación quirúrgica cruenta por enfermedades corrientes, tales como traumatismos, extirpación de tumores o cirugía protésica de rodilla, cadera u otras partes del cuerpo. Durante horas, la anestesia suprime el dolor y otras experiencias conscientes, paraliza el movimiento y estabiliza el sistema nervioso autónomo, controlador de la respiración y otras funciones básicas. El paciente entra en el quirófano con la expectativa de que no se despertará durante la operación y que no tendrá que lidiar con recuerdos traumáticos de lo ocurrido allí, que podrían perseguirle el resto de su vida. Por desgracia, este objetivo no siempre se cumple. Un pequeño porcentaje de los operados, estimado en uno de cada mil, sufre un despertar intraoperatorio, sobre todo cuando el anestesista paraliza el cuerpo para facilitar la intubación e impedir movimientos musculares bruscos. Puesto que cada año millones de personas se someten a intervenciones que precisan anestesia, esa pequeña fracción se traduce en miles de despertares inoportunos.

La profundidad de la anestesia durante la intervención se monitoriza con el EEG. Sin embargo, ninguno de los numerosísimos anestésicos que existen funciona de manera sistemática en todos los operados, que van desde neonatos hasta pacientes muy ancianos. Hace falta una herramienta que permita monitorizar de manera fiable la presencia de consciencia en un amplio espectro de estados normales y patológicos, bajo condiciones agudas (anestesia) y crónicas (daño neurológico).

LA NATURALEZA DE LA EXPERIENCIA CONSCIENTE

Para detectar la consciencia es necesario considerar dos caracteres esenciales de cualquier experiencia subjetiva, no importa cuán mundana o extraordinaria sea. Primero, por definición, toda experiencia es distinta de las demás. Es específica del momento y el lugar en el que ocurre. Cada una aporta mucha información: piense, por ejemplo, en la singular riqueza visual que brinda una excursión por los Alpes o por el Himalaya, pongamos por caso. Ahora combine esa evocación con otros sentidos, como los sonidos o los olores, o con las emociones y los recuerdos. Cada una es distinta a su modo. El segundo punto es que cada experiencia es continua, está integrada y es holística. No se puede separar la imagen del humo negro brotando de las Torres Gemelas contra el cielo azul en media experiencia para la Torre Norte y otra media para la Torre Sur.

La hipótesis actual más prometedora sobre la consciencia, que abarca ambas ideas, es la teoría de la información integrada (TII). Concebida por Giulio Tononi, psiquiatra y neurocientífico de la Universidad de Wisconsin-Madison, la TII enfatiza el aspecto diferenciado e integrado de toda experiencia subjetiva y postula que el mecanismo que mantiene la experiencia consciente en la neocorteza cerebral debe igualmente incorporar esos dos atributos. Para probar hasta qué medida estos mecanismos permanecen intactos, Tononi, junto con un equipo que incluía al neurólogo y neurocientífico Marcello Massimini, ahora en la Universidad de Milán, ideó en los primeros años del presente milenio un método basado en el EEG que ofrece una aproximación burda al cálculo formal de la TII. El equipo verificó su validez básica distinguiendo correctamente entre en qué momentos seis voluntarios permanecían conscientes, pero descansando tranquilamente con los ojos cerrados, y cuándo estaban sumidos en un sueño profundo y, por ende, inconscientes.

El cerebro de una persona que duerme profundamente se comporta como una campana aturdida y mal afinada. La amplitud inicial del EEG es mayor que en el curso de la vigilia, pero su duración es mucho menor y no reverbera a través de la corteza hacia otras regiones conectadas. Y aunque multitud de neuronas se mantienen activas durante el sueño profundo, como evidencia la fuerte respuesta en una región local del cerebro, la integración queda rota. Apenas hallamos una pequeña parte de la actividad eléctrica que predomina en el cerebro despierto. Distinguir la respuesta del cerebro en descanso de la que genera durante el sueño puede parecer trivial, pero el método puede hacerse extensible a la tarea más difícil de discriminar entre varios estados cerebrales. De hecho, en los años transcurridos, Tononi, Massimini y otros 17 médicos y científicos han probado el procedimiento en muchas más personas. En 2016 se publicó un artículo que resumía este estudio histórico.

El método «golpea» el cerebro con un único impulso de energía magnética emitido por un solenoide de cable encapsulado y sujeto al cuero cabelludo: es la llamada estimulación magnética transcraneal, o EMT. Esta técnica desata una breve corriente eléctrica en las neuronas corticales subyacentes, que, a su vez activan a otras neuronas en una cascada que reverbera dentro de la cabeza antes de que la sobrecarga eléctrica desaparezca en una fracción de segundo. Imagine que el cerebro es una gran campana de iglesia y que el dispositivo EMT es el badajo. Una vez golpeada, si está bien forjada, sonará con su tono característico durante un tiempo considerable, como hace el cerebro. Su actividad eléctrica se monitoriza con un casco de EEG de alta densidad que el paciente lleva puesto. El EEG se promedia y se muestra durante el curso de 200 impulsos de EMT, como si fuera una película corriendo en el tiempo.

En el cerebro despierto, con su conectividad intacta, la monitorización de la respuesta a la estimulación en distintas zonas

muestra un patrón sumamente complejo en gran parte de la corteza, actividad que ni es totalmente predecible ni completamente aleatoria, y es emblemática de lo que se quiere decir con «complejo».

Los investigadores estiman su complejidad (el grado en que esta respuesta difiere a lo largo de la corteza y del tiempo) por medio de una magnitud matemática que captura su diversidad. La técnica se toma prestada de la informática y es la base del algoritmo de la popular compresión «zip», que reduce el espacio que ocupan las imágenes o los vídeos. Por este motivo, y por el onomatopéyico «zap» con que designamos coloquialmente los impulsos magnéticos, el procedimiento completo para medir la consciencia se ha llamado «zap y zip». En última instancia, la respuesta EEG de cada persona se cartografía en un único número, el índice de complejidad de perturbación o ICP (por sus siglas en inglés). Si el cerebro no reacciona a la estimulación magnética —digamos que porque la actividad cortical está abolida o es mínima— el ICP será cercano a 0, en tanto que la complejidad máxima dará un valor igual a uno. Cuanto mayor sea el índice, más diversa habrá sido la respuesta del cerebro al impulso magnético.

ZAP Y ZIP EN LOS PACIENTES

La lógica del estudio de 2016, en el que participaron pacientes de centros especializados de Bélgica e Italia, es sencilla. En un primer paso, la técnica se aplica a una población normal para inferir el valor de corte (llamado ICP*) por encima del cual se piensa que la consciencia está presente. En todos los casos en que la consciencia se confirme de manera fiable en cualquier sujeto, los valores del ICP deberán ser superiores al ICP*, y en todos los casos en que el sujeto esté inconsciente, los valores del ICP deberán estar por debajo de ese límite. Este procedimiento establece el ICP* como el límite crítico para sustentar la consciencia (la mínima medida de actividad compleja en el cerebro). Entonces, en un segundo paso, este umbral permite deducir si los pacientes que viven en la zona gris, donde las medidas más convencionales no son suficientes, conservan algún grado de consciencia.

En el estudio, la población de referencia usada para calibrar el procedimiento comprendía dos grupos. Uno consistía en 102 voluntarios sanos sumidos en diversos estados de consciencia e inconsciencia: despiertos y sosegados con los ojos cerrados, o inmersos en un sueño durante la fase REM (esta última situación se considera también estado consciente y se evaluó despertando al azar a los durmientes en la fase REM; se incluyeron sus EEG en los resultados finales únicamente si referían haber estado soñando justo antes de despertar). También se evaluaron los EEG generados bajo el efecto de la ketamina, un anestésico que desconecta la mente del mundo externo, pero no extingue la consciencia. (En dosis bajas, la ketamina se consume como alucinógeno, apelada vitamina K). Las condiciones de inconsciencia en las que se practicó el EEG durante el estudio fueron las siguientes: sueño profundo (sin sueños inmediatamente antes de ser despertados) y anestesia quirúrgica con tres agentes (midalozam, xenón y propofol). Como control, el estudio contó con 48 pacientes con daño cerebral pero que estaban conscientes y respondían a estímulos, que fueron evaluados mientras estaban despiertos.

Los investigadores constataron que era posible inferir la consciencia con certeza absoluta en todos los participantes usando un mismo valor ICP*: 0,31. Esto es, en cada una de las 540 condiciones examinadas en los 150 sujetos, si la respuesta eléctrica era igual o menor a ese valor límite, el sujeto estaba inconsciente; si estaba por encima del ICP*, permanecía consciente. Todos los participantes, ya fueran voluntarios sanos o pacientes con daño cerebral, fueron clasificados correctamente. Este éxito resulta notable a tenor de la variabilidad de género, edad y localización de la aplicación de los impulsos de EMT sobre el cerebro, así como de los trastornos médicos y de comportamiento presentes en el colectivo del estudio.

El equipo aplicó entonces la técnica con ese valor umbral (0,31) a otro grupo de afectados por trastornos graves de la consciencia, en estado de mínima consciencia (EMC) o de vigilia sin respuesta (SVSR). En el grupo de EMC, formado por los pacientes que presentan al menos algún signo de comportamiento, aparte de las meras respuestas reflejas, como la respiración, el método asignó correctamente el estado consciente a 36 de los 38 integrantes, y erró en los dos restantes al diagnosticarlos como inconscientes. De los 43 pacientes con SVSR, sin posibilidad de comunicación, 34 mostraron una respuesta cerebral con menor complejidad que la de cualquier sujeto de la población de referencia en estado consciente, un resultado previsto. Es decir, la complejidad de sus respuestas EEG era equiparable a la del grupo de referencia cuando no se detectaba consciencia.

Mucho más inquietantes fueron, empero, los otros nueve pacientes que respondieron a los impulsos de EMT con un patrón complejo de actividad eléctrica por encima del umbral. Es decir, la complejidad de perturbación de su respuesta cerebral era tan alta como la de muchos controles de referencia conscientes. Estos pacientes con respuestas corticales altamente complejas pueden experimentar algo, pero son incapaces de comunicarse con el mundo y con sus seres queridos.

Como cualquier experimento culminado con éxito, este abre nuevas líneas de pensamiento. ¿Cómo refinar el método para que ofrezca una certeza del cien por cien en los pacientes con mínima consciencia? ¿Podrían examinarse otros colectivos de pacientes, como aquellos en catatonia, demencia avanzada, neonatos y niños pequeños? Otra pregunta es si sería posible concebir otras medidas fisiológicas o comportamentales que corroboren la conservación de la consciencia en algunos pacientes con SVSR. ¿Podrá el método convertirse en una herramienta de pronóstico, que infiera hasta qué medida el paciente está en vías de recuperación? Estas preguntas necesitan abordarse en el futuro. Entretanto, celebremos este hito en el camino por desentrañar la histórica dualidad entre la mente y el cuerpo. IyC

PARA SABER MÁS

Breakdown of cortical effective connectivity during sleep. Marcello Massimini et al. en *Science*, vol. 309, págs. 2228-2232, 30 de septiembre de 2005.

A theoretically based index of consciousness independent of sensory processing and behavior. Adenauer G. Casali et al. en *Science Translational Medicine*, vol. 5, n.º 198, art. 198ra105, 14 de agosto de 2013.

Stratification of unresponsive patients by an independently validated index of brain complexity. Silvia Casarotto et al. en *Annals of Neurology*, vol. 80, n.º 5, págs. 718-729, noviembre de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Una nueva era en el diagnóstico del estado vegetativo. Davinia Fernández Espejo en *MyC* n.º 58, 2013.

Medidor de la consciencia. Christof Koch en *MyC* n.º 64, 2014.

Teoría de la información integrada. Christof Koch en *MyC* n.º 73, 2015.



CAPTURAR INUNDACIONES PARA COMBATIR SEQUÍAS

Un nuevo enfoque propone recargar los acuíferos con el agua de las crecidas y bombearlos cuando escasean las lluvias

Erica Gies

«La 17 está cerrada, la Skyline Boulevard está cerrada, la nueve está cerrada, la 152 está cerrada». Mi madre me fue dando nombres de carreteras entre la bahía de San Francisco y la costa del Pacífico, por donde yo tenía pensado conducir a la mañana siguiente. Las lluvias torrenciales del invierno habían dejado las laderas de California tan empapadas que se desplomaban sobre las carreteras. Entre octubre de 2016 y febrero de 2017, el estado recibió casi el doble del promedio anual de precipitaciones para esa época del año. Mi madre, californiana de toda la vida, no había visto nada igual.

Se trataba de un cambio vertiginoso en comparación con los cinco años anteriores, durante los cuales hubo momentos en que el cien por cien de California sufría de sequía. El miedo era palpable: ¿podemos continuar viviendo aquí?, ¿podemos mantener a nuevos residentes?, ¿deberíamos seguir produciendo alimentos para exportarlos? Las lluvias torrenciales supusieron inicialmente un alivio, pero después despertaron una creciente inquietud. Sin embargo, los gestores de recursos hídricos californianos, todavía traumatizados por los años de necesidad, vieron la oportunidad y se preguntaron: ¿podríamos capturar este excedente de agua y almacenarlo para la siguiente sequía?

La pregunta refleja una nueva realidad. Aunque California ha experimentado continuos ciclos de sequías e inundaciones, los científicos consideran que ambas fases se están intensificando debido al cambio climático. Además, el aumento de las

Erica Gies, californiana de quinta generación, escribe sobre ciencia y medioambiente. Sus trabajos aparecen en *New York Times*, *The Guardian* y *The Economist*, entre otras publicaciones.





temperaturas está causando ya la disminución del manto de nieve de Sierra Nevada, que, según las previsiones, llegará a reducirse hasta en un 90 por ciento. Esto acarreará problemas. La mayor parte de las precipitaciones registradas en el estado cae en invierno, mientras que los veranos suelen ser secos. La nieve se funde lentamente a lo largo de la primavera y el verano, justo cuando más se necesita, y suministra un promedio del 30 por ciento del agua destinada al consumo humano en California. En un futuro, se estima que la nieve caerá en forma de lluvia, lo que supondrá más inundaciones en invierno y un suministro de agua todavía más escaso en verano. El crecimiento demográfico complica esas fluctuaciones ya de por sí más acentuadas: cada vez hay más personas que viven en las trayectorias de las inundaciones y necesitan agua durante las sequías.

Los cambios en los regímenes de precipitaciones y el aumento demográfico exigen una adaptación a escala mundial. Millones de personas que han dependido de la nieve y del goteo de los glaciares deberán contar con nuevas formas de capturar el agua procedente de las inundaciones.

En California, como en otras regiones, la construcción de nuevos embalses no pondrá fin al problema. «Ya hemos levantado presas en la mayoría de los ríos», afirma Felicia Marcus, presidenta de la Junta Estatal de Control de Recursos Hídricos. Pero hay abundante espacio en el subsuelo. Los acuíferos (grandes depósitos subterráneos de agua), esquilmados por el bombeo practicado por los agricultores con unos pozos cada vez más profundos, tienen una capacidad diez veces superior a la de los 1400 embalses de California. Y el almacenamiento del agua subterránea cuesta una quinta parte de lo que cuestan los embalses. Un conjunto de mentes con visión de futuro, de los ámbitos de la ciencia, la agricultura, la conservación y la gestión pública, están diseñando una serie de métodos para almacenar agua en el subsuelo a una escala sin precedentes. El objetivo es doble: reducir los daños de las inundaciones y aumentar las reservas.

Hubo un tiempo en que tanto las inundaciones invernales como el deshielo primaveral se extendían por todo el valle central californiano y se infiltraban mansamente hacia los acuíferos. Las aguas alimentaban bosques de ribera y charcas de primavera que servían de sustento a uapitíes, osos grises, bandadas de pájaros y concurridas carreras de salmones. Pero todo cambió en el siglo xx, cuando California se convirtió en el vértice de la ingeniería hidráulica desmesurada. Las enormes presas, embalses, acueductos, canales, diques y bombas de extracción transformaron la dinámica hidráulica de todo el estado, con un sinfín de consecuencias imprevistas. El despliegue masivo de infraestructuras hizo posible la California moderna, pero los recientes episodios de sequías e inundaciones han puesto en evidencia lo mal preparado que está este sistema para hacer frente a la realidad actual. Uno de sus defectos principales consiste en que, al haber desconectado los ríos de sus llanuras de inundación con el fin de proteger ciudades y fincas agrícolas, los ingenieros han restringido en gran medida la recarga de los acuíferos.

Hoy, administradores e ingenieros tratan de recuperar, en alguna medida, la dinámica natural permitiendo inundaciones controladas. Llevar la idea a la realidad implicaría modificar la disfuncional cultura del «¡mía!, ¡mía!» que ha caracterizado durante tanto tiempo el consumo de agua en California. Pero existen síntomas de cambio. En 2014, se aprobó en el estado una innovadora ley que aumenta la responsabilidad de los consumidores locales en la gestión prudente del agua. Asimismo, en contraposición a las grandes obras de ingeniería hidráulica, la nueva perspectiva comprendería un mosaico de miles de proyectos de recarga a escalas menores en cuencas de agua individuales.

Con ese objetivo, los científicos y los administradores locales están poniendo en práctica proyectos piloto para estudiar la forma de explotar la hidrología específica de cada punto y evaluar el aprovechamiento del terreno y la gestión financiera. Buscan soluciones que puedan ser de múltiple utilidad; por ejemplo, anegar los campos de cultivo para reponer acuíferos en momentos en que no dañen las cosechas y beneficien a la vida salvaje.

EL ESPEJISMO DEL BOMBEO

Los proyectos de mayor éxito parten de corregir arraigados malentendidos sobre las nociones básicas de la hidrología. El

EN SÍNTESIS

California podría sobrellevar mejor los años de inundaciones y los de sequía capturando las crecidas y reponiendo con ellas los acuíferos que los agricultores y los municipios bombean actualmente cuando escasean las lluvias.

Para ello, consumidores y administradores deben pensar en las aguas superficiales y subterráneas como en un solo recurso interconectado.

Una serie de proyectos experimentales demuestran que el planteamiento puede funcionar. Por ejemplo, los campos de cultivo pueden anegarse para que el agua se infiltre en los acuíferos, aun cuando los cultivos estén creciendo.

La revisión de los derechos sobre el agua y el pago a los propietarios de los terrenos por permitir inundarlos pueden servir para que estos procedimientos funcionen tanto en California como en el resto del mundo.

BOMBOLAND (*páginas anteriores*); CORTESÍA DE JUDAH GROSSMAN, *THE NATURE CONSERVANCY* (*ambas páginas*)



LA PROLONGADA SEQUÍA ha evaporado en exceso la llanura de inundación de la reserva natural del río Cosumnes de California. Pero, cuando las lluvias del pasado invierno causaron la crecida del río (*en el horizonte*), un corte realizado en el dique permitió expandir la inundación para que pudiera infiltrarse más agua a través del terreno, y recargarse así el acuífero subyacente.

pasado abril, tras cuatro meses de intensas tormentas, la sequía de California quedó limitada al nueve por ciento del estado y el gobernador Jerry Brown la declaró terminada. Pero «se trata de un enfoque únicamente basado en las aguas superficiales», señala Sandi Matsumoto, directora asociada del programa hidrológico para California de la organización sin ánimo de lucro The Nature Conservacy (TNC). El agua de un acuífero es, en realidad, la misma que la de los lagos, ríos y corrientes situados por encima. Toda ella se halla intrincadamente conectada por la gravedad y la presión hidráulica. Según Matsumoto, aunque las aguas superficiales de California parezcan recuperadas este año, los acuíferos presentan todavía una extrema carencia de agua tras las décadas de bombeo agresivo practicado por agricultores y municipios. «Nos llevará décadas, puede que medio siglo, recuperarnos de lo que hemos hecho», afirma.

El agua subterránea satisface cerca del 60 por ciento de la demanda californiana en los años secos y el 30 por ciento en los años promedio. Pero ninguna de esas cifras es sostenible, puesto que las aguas superficiales que se infiltran para reponer las aguas subterráneas no pueden mantener ese ritmo. De acuerdo con un estudio efectuado en 2015, a partir de los datos de la NASA obtenidos con satélites, más de la mitad de los mayores acuíferos del mundo han superado el punto crítico.

Lo preocupante es que la mayor parte del agua bombeada les sirve a los agricultores para llenar las cestas de comida del planeta. Sería catastrófico que esos terrenos quedaran en barbecho a causa del agotamiento del agua subterránea; hay que tener en cuenta que, según la FAO, necesitamos aumentar la producción mundial de alimentos en un 70 por ciento para dar de comer a los 9100 millones de personas que, se espera, habrá en 2050.

Durante más de un siglo, California gestionó únicamente sus aguas superficiales. Las subterráneas, por el contrario, eran un derecho de propiedad: se podía perforar pozos y bombear toda el agua que fuera necesaria sin importar cómo pudiera afectar al suministro de los vecinos. Esa escisión en la gestión trató las aguas superficiales y subterráneas como dos recursos independientes, a pesar de que un acuífero lleno puede alimentar el flujo de un río durante la estación seca y, a su vez, el agua fluvial puede infiltrarse en el terreno y reponer las aguas subterráneas cuando los niveles de estas descienden.

Por tanto, el bombeo de un acuífero deprimido puede causar el agotamiento del agua superficial, el principal y primer problema por el que los agricultores y las ciudades deben precisamente bombear. En el valle de San Joaquín, los niveles freáticos han descendido tanto en algunos lugares que, desde el punto de vista funcional, han quedado desconectados de las corrientes con las que una vez intercambiaban agua, explica Helen E. Dahlke, profesora de Ciencias Hidrológicas Integradas de la Universidad de California en Davis. Como seca humedales, filtraciones y manantiales, esa desconexión también perjudica a las especies acuáticas. La recarga del agua subterránea podría reconectar algunos acuíferos con sus ríos y fortalecería el sistema hidrológico en su totalidad. Esas múltiples ventajas representan «la manera en que deberíamos funcionar en el futuro», afirma Marcus, «en lugar de tener que luchar cada uno por nuestra molécula de agua».

Esa filosofía aleja los nuevos proyectos experimentales de California de las formas anteriores de enfocar el almacenamiento, que consideraban los acuíferos como un banco de agua: si se hacía un aporte, se podía retirar una cantidad equivalente. El problema radica en que el agua no permanece forzosamente en una cuenca subterránea bien definida a la espera de ser bombeada cuando se la necesite. Para que la nueva idea del estado de California se materialice, la población deberá redirigir su concepto de propiedad del agua hacia algo más comunal. En España, por ejemplo, se ha aplicado ese planteamiento, según Àlvar Escrivà i Bou, investigador valenciano que trabaja en el Centro de Política Hidráulica del Instituto de Políticas Públicas de California (PPIC).

EL COMPROMISO REVOLUCIONARIO

En California, los derechos sobre el agua se habían considerado políticamente inviolables hasta la reciente sequía, en la que el consiguiente bombeo, movido por el pánico, abrió una nueva puerta. Tras décadas de tentativas, el legislativo estatal aprobó la reforma más significativa del siglo en cuestión de recursos hídricos: la Ley de Gestión Sostenible de Aguas Subterráneas (SGMA), de 2014. Prescribe que la gestión hidráulica se base en las cuencas subterráneas, zonas tridimensionales que engloban las aguas superficiales y el acuífero permeable que se halla debajo. De las 515 cuencas existentes en California, 127 reportan el 96 por ciento del bombeo de agua subterránea, por lo que el estado las ha priorizado para que reciban una gestión más efectiva. Cada cuenca debe crear una agencia de sostenibilidad de las aguas subterráneas, tener diseñado un plan de sostenibilidad en 2022 y lograrlo antes de 2040. Alcanzar ese objetivo representa una ardua tarea dado que, en la mayoría de las cuencas, no se toman datos de una forma consistente, según Tara Moran, supervisora de proyectos de sostenibilidad de aguas subterráneas dentro del programa Agua en el Oeste, de la Universidad Stanford.

Las normativas de la SGMA estimulan la recarga al exigir a las ciudades y a los distritos de riego que pongan fin al agotamiento del agua subterránea. «La mayoría de las agencias de sostenibilidad de aguas subterráneas preferirían reponer el agua antes que restringir el bombeo», apunta Esther Conrad, investigadora posdoctoral de Agua en el Oeste, que ha asistido a reuniones locales sobre cuestiones hidráulicas por todo el estado.

Para inspirarse, las agencias pueden examinar los casos en que las poblaciones debieron enfrentarse a cuencas conflictivas unas décadas atrás. Una de estas es el valle de Santa Clara,

Un único y gran suministro de agua

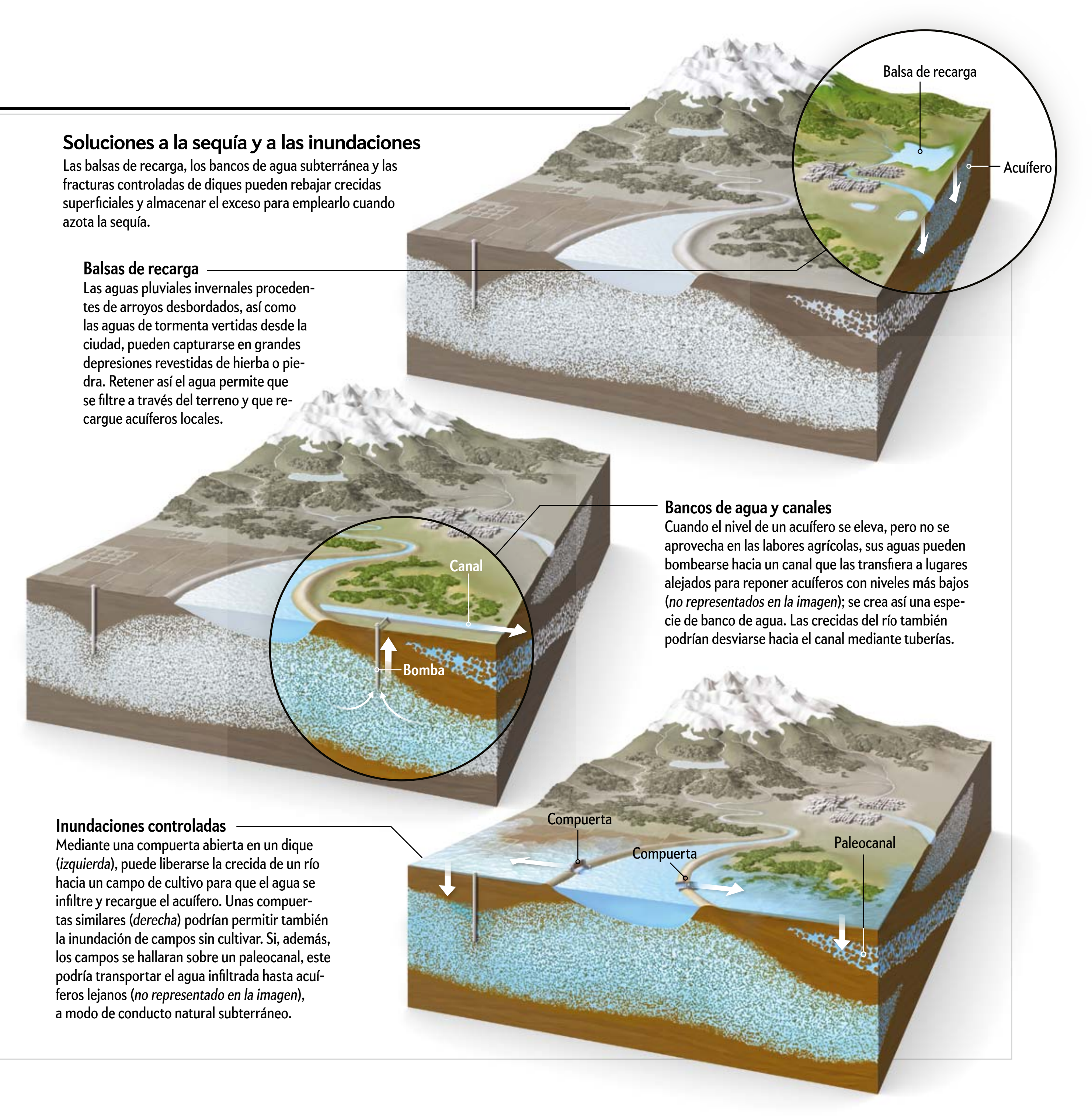
Las aguas superficiales y subterráneas se encuentran íntimamente conectadas. El agua de los ríos y los arroyos suele infiltrarse hasta alcanzar los acuíferos subterráneos. Si el nivel de un río desciende como resultado de una sequía, el del acuífero puede que también lo haga. Y si una finca agrícola o una población rebaja el nivel del acuífero al bombear el agua, el del río también puede descender. El deshielo primaveral en lugares como California supone una fuente primordial de agua para ríos y acuíferos, por lo que una menor capa de nieve invernal como consecuencia del calentamiento global puede reducir ese suministro vital.

EMILY COOPER

hoy conocido como Silicon Valley. En los siglos XIX y XX, se denominaba el valle de las Delicias del Corazón, en referencia a las huertas de frutas de hueso: albaricoques Blenheim, cerezas Bing, ciruelas Burbank. Con el fin de mantener viables las cosechas durante los estíos secos, los granjeros bombeaban agua subterránea efusivamente. Pero el entusiasmo no duró mucho. Entre 1890 y 1920, los niveles freáticos se desplomaron y la superficie del terreno subsidió. El centro de San José se hundió unos cuatro metros.

Los responsables de allí decidieron tratar de reponer los acuíferos capturando torrentes de agua que, de otra manera, irían a parar al mar en forma de arroyos y ríos. Del mismo modo que los castores construyen presas en las corrientes para estancar el agua, los ingenieros humanos emplearon sacos de arpillera rellenos de tierra para construir barreras parciales a través del arroyo Page, en Los Gatos. Las estructuras empantanaban los márgenes del río de forma que el agua disponía de tiempo suficiente para infiltrarse bajo tierra. Seguidamente, se levantaron presas de tierra compactada, como la de Vasona, de unos diez metros de altura, en el arroyo Los Gatos. Las lluvias torrenciales podían anegar el parque municipal que bordea la presa y aportar así una recarga adicional sin poner en peligro casas y negocios. Los proyectos hidráulicos paralizaron la subsidencia del terreno y el descenso de los niveles freáticos. Pero la población del valle aumentó drásticamente a partir de la Segunda Guerra Mundial y necesitó más agua de la que el ecosistema podía suministrar de forma natural. Para obtenerla, la tomaron con tuberías de los canales que iban del norte al sur del estado.

En la actualidad, el distrito hidrológico del valle de Santa Clara se beneficia de las balsas de recarga, barreras construidas



por la población a lo largo de más de 140 kilómetros de arroyos locales, con la función de ralentizar la corriente para que se desborde y el agua se infiltre en el subsuelo. El distrito cuenta con 120 hectáreas de balsas de recarga independientes, que se alimentan del agua canalizada desde los arroyos cercanos cuando hay crecidas. La recarga mostró su verdadero alcance durante la reciente sequía: el agua subterránea aportó el 51 por ciento del agua del condado en 2014, a pesar de la grave escasez de agua de California.

DEJARSE LLEVAR POR LA CORRIENTE

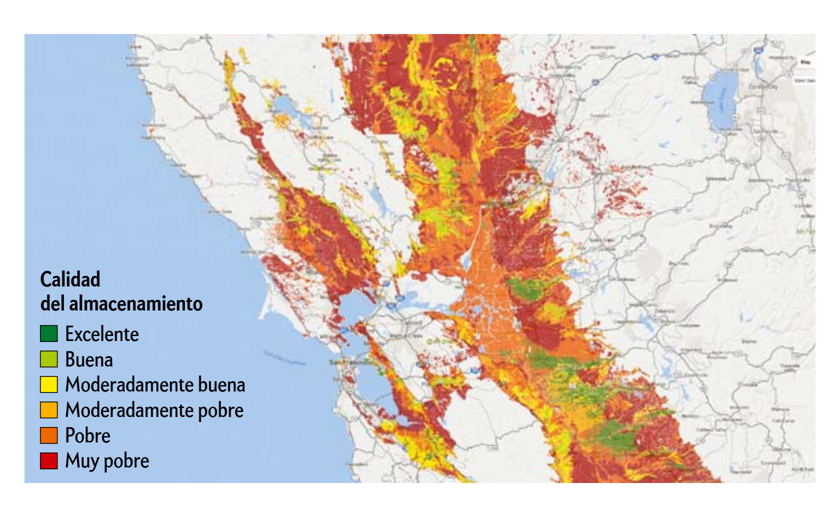
La pregunta inmediata acerca de la recarga generalizada del agua subterránea es: ¿de dónde procederá el agua? «La mayoría de los permisos [derechos sobre el agua] se conceden para la temporada de siembra y cultivo», explica Marcus. «Hay un abundante exceso de agua en invierno». Un trabajo publicado por Dahlke el pasado julio confirma que existe suficiente como para realimentar los acuíferos del valle Central.

El reto consiste en transportar el agua, cuando llueve, a los lugares donde puede infiltrarse en el terreno. En California, se registran más precipitaciones en el norte durante el invierno y se consume más agua en el sur durante el verano. Sin embargo, los grandes canales y acueductos que abastecen desde el norte a los sistemas de riego del sur se encuentran infrautilizados durante el invierno al disminuir el número de agricultores que necesitan regar. La infraestructura podría destinar el exceso de agua invernal a los terrenos agrícolas situados más al sur en lugar de dejar que vaya a parar al océano.

Otra opción son los bancos de agua «inversos». Las áreas que disponen de más agua, como las explotaciones agrarias cer-

canas al río Sacramento, bombearían el agua subterránea, cuando esta abunda en los años húmedos, para regar sus cosechas, y enviarían sus aguas superficiales al sur para reponer los acuíferos más necesitados haciendo uso de las infraestructuras existentes, explica Ellen Hanak, directora del Centro de Política Hídrica del PPIC. Eso sí, la contabilidad sería difícil. Los administradores todavía deben diseñar estrategias de compensación antes de que se generalice esta forma de actuar.

Por otro lado, capturar el excedente de agua invernal también resulta difícil «porque todo se encuentra saturado y cada embalse está lleno», añade Hanak. Pero algunos terrenos ya están listos para funcionar como válvulas de alivio ante las inundaciones; ampliar su extensión permitiría la recarga en esas áreas, o emplearlas como almacenes temporales hasta que las tuberías u otras estructuras puedan transportar el agua para reponer reservas más lejanas. Para hacerme una idea de cómo se materializaría el proyecto, me desplacé en febrero al delta del Sacramento-San Joaquín, donde los dos grandes ríos, procedentes del norte y del sur, convergen, serpentean y, finalmente, vierten sus aguas en la bahía de San Francisco. Durante más de un siglo, algunos agricultores remodelaron el terreno pantanoso construyendo diques de tierra compactada para crear áreas de cultivo resguardadas de las inundaciones fluviales.



ALMACENAMIENTO ÓPTIMO DE AGUA: Permitir inundaciones en determinadas áreas de California maximizaría el volumen de agua infiltrada en los acuíferos subterráneos para su almacenamiento. Los mejores lugares (*verde y amarillo*) presentan topografías planas y suelos permeables que drenan con rapidez y no se compactan.

FUENTE: ÍNDICE PARA BANCOS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN TERRENO AGRÍCOLA (SAGBI), DIVISIÓN DE AGRICULTURA Y RECURSOS NATURALES DE LA UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA; CORTESÍA DE ANTHONY O'GEEN Y HTTPS://CASOILRESOURCE.LAWR.UCDAVIS.EDU/SAGBI/

Al llegar, me reuní con Josh Viers, experto en cuencas hidrográficas de la Universidad de California en Merced, en el área de recuperación Oneto-Denier, dentro de la reserva natural del río Cosumnes. Se unieron a nosotros dos expertos de la asociación TNC, entre ellos Judah Grossman, director del proyecto. Nos subimos a un dique de tierra flanqueado en ambos lados por aguas de inundación que alcanzaban entre uno y dos metros de profundidad. A escasa distancia, emergían del agua robles, álamos y arbustos del valle. Más allá, se extendían los campos anegados donde TNC trata de recuperar el hábitat originario. La inundación se había expandido porque, en 2014, los ingenieros retiraron 230 metros del dique con el fin de que el río Cosumnes anegara durante las crecidas esa zona de su llanura de inundación.

El invierno pasado se puso a prueba la zona que quedó anegada al quitarse de esta forma aquella parte del dique. El hidrogeólogo Graham Fogg, del Centro de Ciencias de Cuencas Hidrográficas de la Universidad de California en Davis, instaló una serie de instrumentos para determinar cuánto se recargaron los acuíferos con esa inundación. Cuando se retiraron las aguas, sus estudiantes calcularon que la inundación había recargado el subsuelo tres veces más de lo que habitualmente se consigue con el agua de la lluvia y del riego. Pese a que el área anegada era de solo unas 115 hectáreas, las tormentas del último invierno recargaron alrededor de 2,5 millones de metros cúbicos. Aguas arriba, el proyecto ya ha estimulado el inicio de otros similares. Y no muy lejos de allí, en Viers, se está analizando también cómo se benefician los peces autóctonos de este tipo de hábitat de llanura de inundación.

CULTIVAR AGUA

Dado que gran parte del valle Central se encuentra hoy cultivado, se estudia la forma de inundar los campos de una manera segura. Un buen punto de recarga en zonas agrarias debe reunir una serie de cualidades, como una superficie considerablemente plana para que el agua pueda infiltrarse de forma uniforme, un terreno permeable que facilite el movimiento rápido del agua subterránea y un suelo con escaso contenido en sal, pesticidas o nutrientes que puedan contaminar las aguas. Y los cultivadores necesitan contar con la seguridad de que el agua no dañará sus tierras o cosechas.

Dahlke crea inundaciones experimentales para determinar el estado de salud de las plantas y las raíces, la velocidad de infiltración del agua y las concentraciones de sal y nitratos. En un campo de alfalfa del valle de Scott, en el norte de California, anegó parcelas experimentales de entre una y dos hectáreas, más o menos, con diferentes frecuencias: entre uno y dos días a la semana, entre tres y cuatro días a la semana, o de forma continuada desde febrero hasta abril. Durante los experimentos que realizó en invierno en el campo entero, de seis hectáreas, recargó unos 166.000 metros cúbicos. «Más del 90 por ciento del agua añadida se infiltró en profundidad», señala. Y no afectó a la cosecha de alfalfa. Como inesperado beneficio secundario, las inundaciones ahuyentaron a los geómidos, unos roedores a los que «les encanta comer alfalfa», comenta Dahlke riendo.

La hidróloga está experimentando en explotaciones reales con otros tipos de cultivo, como los almendros, a pesar de que, según la sabiduría popular, son sensibles al agua estancada por encima de sus raíces. Después de las inundaciones deliberadamente creadas en invierno y a comienzos de la primavera, el momento de la floración y el brote de las hojas coincidió con el de los almendrales adyacentes que no habían sido inundados. «Eso es ya buena señal», afirma Dahlke.

Otra dificultad es la de mantener los nutrientes y los pesticidas alejados de las aguas subterráneas. Obligará a programar la aplicación de los fertilizantes distanciándola en el tiempo de las inundaciones «para que no cree un monstruo», aclara Thomas Harter, otro hidrólogo de la Universidad de California en Davis, coautor de un pionero informe para el estado de California sobre la contaminación de las aguas subterráneas.

Tras observar que un viñedo vecino daba buenas cosechas, pese a haber estado inundado durante meses después de unas lluvias torrenciales de 1983, un fruticultor ha ido muy por de-

lante de los científicos. Don Cameron es el administrador del rancho Terranova, una finca de 2800 hectáreas al suroeste de Fresno, en el valle de San Joaquín, que produce 25 tipos distintos de cultivos empleando solo agua subterránea. En 2011 y en el pasado invierno, la Asociación de Aguas del Río de los Santos Reyes le permitió a Cameron aprovechar el agua de una crecida que sus miembros no estaban utilizando. La canalizó hacia barbechos y hacia campos de alfalfa, uva para vino, nueces, almendras y pistachos. Funcionó: las cosechas no sufrieron y unos sensores demostraron que al menos el 70 por ciento del agua había percolado por debajo de la zona de las raíces hacia el acuífero.

Los agricultores que deseen imitar la iniciativa de Cameron podrían enfrentarse a un mayor número de problemas a la hora de aprovechar el agua invernal. En la mayoría de los casos necesitarán un permiso cuya obtención está sujeta a un largo proceso. Parte de la demora se debe a la existencia de datos anticuados. «La información relativa a los derechos sobre el agua se halla registrada en diez millones de documentos en papel almacenados en el Consejo Estatal de Control de Recursos Hídricos y repartidos por 58 juzgados de todo el estado», señala Michael Kiparsky, director del Instituto Hidrológico Wheeler, de la Facultad de Derecho de la Universidad de California en Berkeley. No es casual que los derechos sobre el agua languidezcan en papel en uno de los epicentros de la cultura digital. Los propietarios de los derechos tienden a pensar que, cuanto menos sepan los demás sobre su consumo de agua, tanto mejor. Kiparsky y Richard Roos-Collins, del Grupo de Derecho de Aguas y Energía, de Berkeley, California, colaboran con el estado para desarrollar una base de datos que les sirva a los consejos hidrológicos regionales para examinar los derechos asociados a una determinada corriente de agua.

UNA MINA DE ORO

Otras mentes innovadoras pagan a los agricultores con el fin de que participen en el almacenamiento de agua subterránea. El pasado mes de septiembre, visité un barbecho anegado del rancho Knaggs, al noroeste de Sacramento, acompañada de Matsumoto y Mark Reynolds, científico jefe del programa de aves migratorias de California de TNC. Allí, el agua que brota de una tubería de riego procedente del cercano río Sacramento crea en 52 hectáreas cierto efecto de «hábitat instantáneo: basta con añadir agua». Atrae a aves, insectos y ranas. Una bandada de agujetas desciende en picado dispuesta a aterrizar; grandes libélulas de color entre pardo y anaranjado zumban a nuestro alrededor y una majestuosa V de grullas canadienses sobrevuela nuestras cabezas.

Las aves acuáticas migratorias dependen de terrenos agrícolas inundados para el 60 por ciento de sus necesidades. Pero, al encontrarse solo de paso, únicamente necesitan el agua durante unas pocas semanas. La inundación del rancho Knaggs forma parte de BirdReturns, un programa de TNC que alquila a los agricultores hábitats que coinciden con la ruta del vuelo migratorio y anega sus campos durante períodos de dos semanas en otoño y primavera.

TNC colabora con agricultores en acuíferos muy agotados. El pasado otoño, la inundación de 83 hectáreas de un arrozal después de la cosecha permitió al distrito de riego de Merced reponer entre 220.000 y 310.000 metros cúbicos de agua subterránea haciendo uso de permisos que ya poseía para el agua invernal. A lo largo de cuatro años, BirdReturns ha recargado cerca de 25 millones de metros cúbicos, según las estimaciones moderadas de la TNC.

En la costa, a Andrew Fisher, hidrogeólogo de la Universidad de California en Santa Cruz, se le ocurrió otra solución creativa para remunerar a los agricultores por recargar. A finales de febrero, me desplacé hasta su proyecto piloto en el valle de Pájaro, al sur de Santa Cruz, siguiendo el consejo de mi madre de dar un rodeo por la carretera 129 para evitar los corrimientos de tierra causados por la lluvia. Las onduladas colinas y los cultivos de la zona suministran al planeta alcachofas, bayas y verduras de hoja. Pero el agua superficial escasea y los agricultores dependen casi por completo del agua subterránea extraída por bombeos. En la década de los ochenta, el bombeo excesivo era ya un grave problema; el estado de California fundó la Agencia de Administración Hídrica del Valle de Pájaro y habilitó a los gestores para cobrar a los consumidores por bombear agua subterránea. El dinero se destina tanto a la construcción y la gestión de una infraestructura que mejore el suministro y la calidad del agua como al cumplimiento de las normativas.

El proyecto de Fisher desvía el excedente de aguas pluviales a una balsa de recarga de hectárea y media de extensión. El pasado invierno, su equipo registró la infiltración de unos 170.000 metros cúbicos. El almacenamiento reporta a los agricultores una compensación contra el pago de sus futuros bombeos, del mismo modo que las compañías eléctricas bonifican a los clientes que cuentan con paneles solares en sus tejados por la energía sobrante que aportan a la red eléctrica.

Asesorada por Fisher, la Agencia de Administración Hídrica del Valle de Pájaro bonifica a los cultivadores por el 50 por ciento de la tasa de infiltración, una cifra prudente que toma en cuenta el agua que se habría infiltrado aun sin sus esfuerzos y el agua infiltrada que «se pierde» bajo tierra y va a parar al sistema hidrológico en toda su amplitud.

Como el espíritu colectivo ha sido la excepción en el panorama hidrológico de California, quienes coordinan estos proyectos piloto esperaban hallar resistencia. Pero se equivocaron. Así, Matsumoto señala que BirdReturns ha recibido el doble de ofertas de las que puede aceptar.

El buen resultado de esos primeros proyectos demuestra que la recarga de las aguas subterráneas puede reportar múltiples beneficios y su éxito alentará a otros a seguir el ejemplo. Las iniciativas también ilustran que, si algo puede cambiar la disfuncional cultura del agua, es el empoderamiento de las diferentes comunidades. «La hidrología consiste tanto en comprender a la gente como en tener en consideración los aspectos científicos», señala Harter. «Las comunidades se muestran mucho más abiertas si pueden hacerse dueñas de la idea».

PARA SABER MÁS

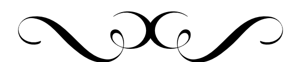
Sustainable groundwater management: What we can learn from California's Central Valley streams. The Nature Conservancy, febrero de 2016.
Availability of high-magnitude streamflow for groundwater banking in the Central Valley, California. Tiffany N. Kocis y Helen E. Dahlke en *Environmental Research Letters*, vol. 12, n.º 8, art. 084009, agosto de 2017.
Índice para bancos de agua subterránea en terreno agrícola (SAGBI) **https://casoilresource.lawr.ucdavis.edu/sagbi/**

EN NUESTRO ARCHIVO

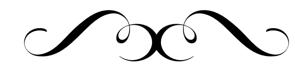
Las aguas subterráneas en el paisaje. F. G. Bernáldez, P. Herrera, C. Levassor y otros en *IyC*, abril de 1987.
Recargar los acuíferos. Jane Braxton Little en *IyC*, diciembre de 2015.



CAVERNA DEL EXPERIMENTO LHCb, en el CERN. El instrumento ha sido diseñado para estudiar aquellas colisiones de protones en las que se generan partículas formadas por quarks de tipo *b*.



El experimento LHCb del CERN ha obtenido posibles indicios de nuevas partículas. De confirmarse, el hallazgo supondría la primera pista hacia una teoría más completa de las interacciones fundamentales



MEDIR LA Belleza

Guy Wilkinson

FOTOGRAFÍAS DE ALASTAIR PHILIP WIPER

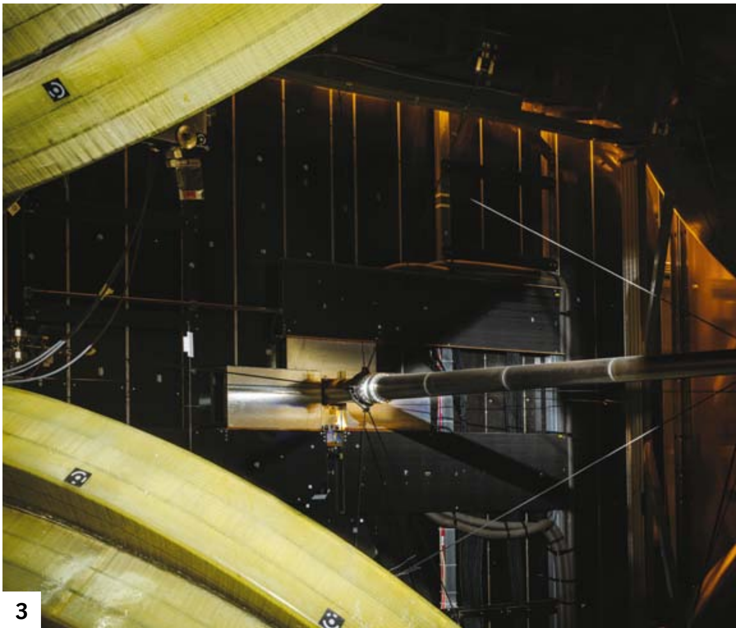


Guy Wilkinson es físico de partículas de la Universidad de Oxford y exportavoz del experimento LHCb del Gran Colisionador de Hadrones.



1

NO ES HABITUAL QUE LOS TELEdiarios abran sus ediciones con una noticia sobre física. Sin embargo, eso fue lo que sucedió el 4 de julio de 2012, cuando las televisiones de todo el mundo comenzaron a informar sobre lo que estaba sucediendo en Ginebra: una búsqueda de casi medio siglo había llegado a su fin con la detección del bosón de Higgs en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. Aquella era la última pieza que faltaba para completar el modelo estándar, la teoría que describe las partículas elementales conocidas y sus interacciones. No obstante, la mayoría de los físicos están convencidos de que la historia no acaba ahí. Cuentan con buenas razones para pensar que aún quedan partículas por descubrir, por lo que hace tiempo que varios experimentos intentan encontrarlas.



3

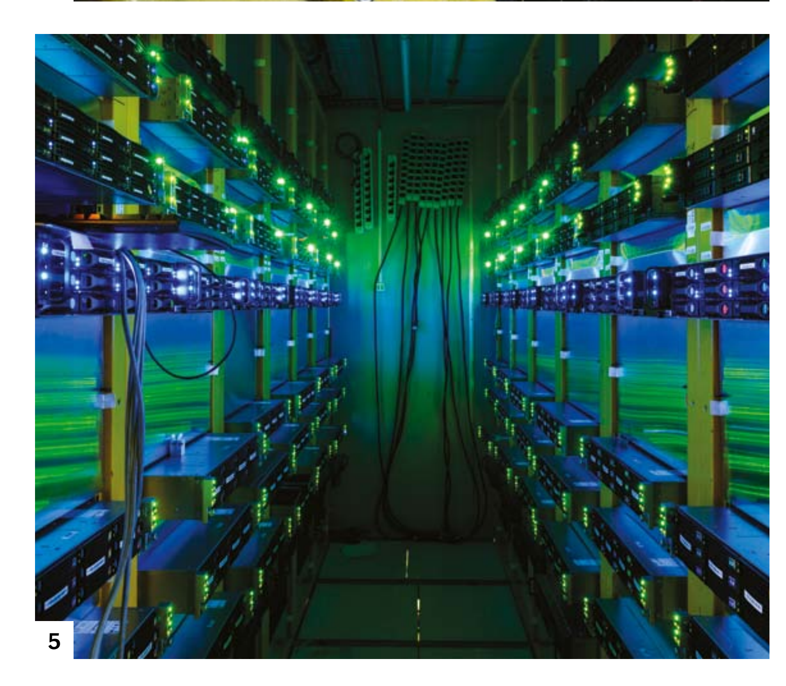


EN SÍNTESIS

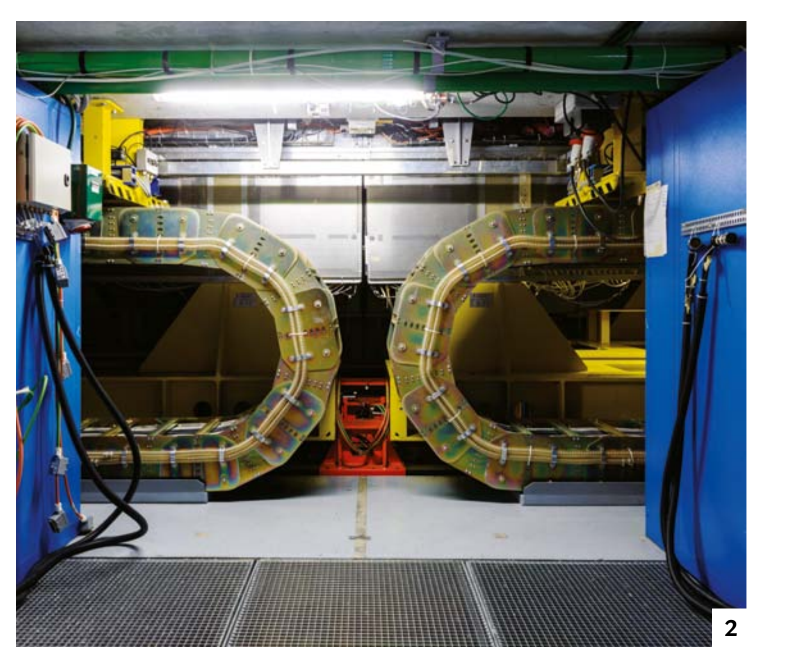
LHCb, uno de los detectores del Gran Colisionador de Hadrones (LHC), está dedicado al estudio de los hadrones apodados «bellos». Estas partículas constituyen un banco de pruebas óptimo para buscar pistas de nuevos fenómenos físicos.

Para ello, el detector sigue una estrategia distinta a la de otros experimentos: en lugar de intentar crear directamente partículas hasta ahora desconocidas, procura detectar sus efectos «virtuales» en las partículas ordinarias.

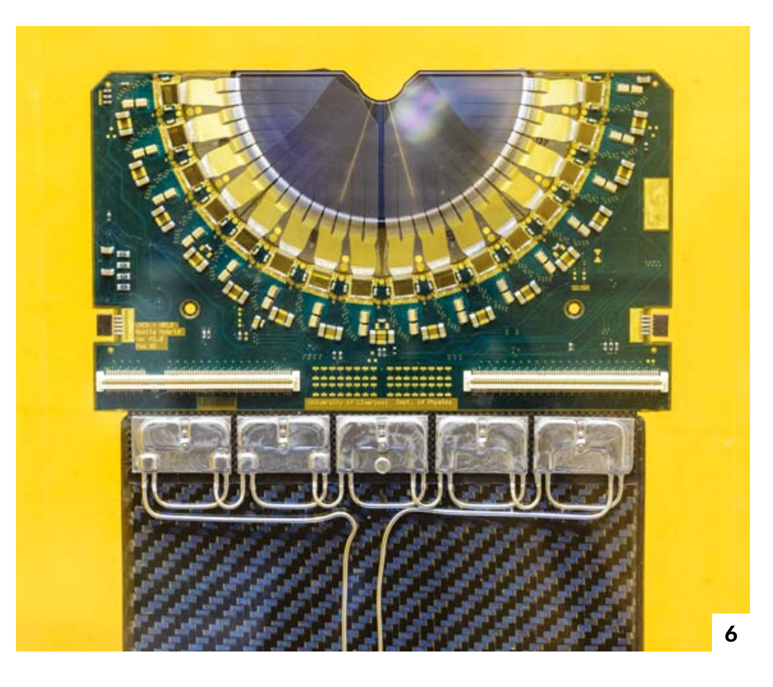
Ya se han obtenido varios resultados que no parecen cuadrar por completo con las predicciones del modelo estándar. Los datos futuros revelarán si se trata o no del primer destello de una nueva teoría del mundo subatómico.



5


2


4


6

EL DETECTOR LHCb, visto desde un lateral (*1*) y desde abajo (*2*), estudia choques entre protones, los cuales llegan al instrumento a través de un tubo de vacío (*3*). El estado del experimento se sigue desde la sala de control (*4*). Un sistema informático (*5*) filtra qué colisiones deben registrarse para su estudio posterior. Varios sensores de silicio (*6*) se encargan de detectar partículas compuestas por quarks *b*.

Al igual que hasta ahora, esta nueva carrera también se lleva a cabo en el LHC. Los dos grandes experimentos que en 2012 descubrieron el bosón de Higgs, ATLAS y CMS, desempeñarán un papel importante en ella. Pero LHCb, un detector más pequeño y menos conocido del mismo acelerador, añadirá un elemento de picaresca a la búsqueda. Gracias a ello, hay una posibilidad real de que sea el primero en llegar a la meta.

LHCb sigue una estrategia distinta a la que suele emplearse en estos casos. Mientras que ATLAS y CMS tratan de crear directamente partículas hasta ahora desconocidas, el experimento LHCb analiza cierto tipo de hadrones, los apodados «bellos», con la esperanza de detectar en su comportamiento efectos indirectos de nuevos fenómenos físicos. Esta clase de hadrones proporcionan un excelente laboratorio, ya que pueden desintegrarse de muchísimas maneras y el modelo estándar predice con gran detalle cómo deberían ocurrir tales procesos. Por tanto, cualquier desviación con respecto a dichas predicciones podría estar causada por la interferencia de nuevas partículas.

Este tipo de búsquedas son complejas y exigen una enorme precisión. Sin embargo, tienen el potencial de detectar el efecto de partículas que ATLAS y CMS no pueden crear de forma directa. De hecho, varios resultados obtenidos en los últimos años parecen desafiar las leyes de la física tal y como las conocemos. El experimento LHCb (cuya b hace referencia a *beauty*, «belleza») podría estar cerca de revelar las leyes que rigen el cosmos a un nivel más fundamental de lo que el ser humano haya visto jamás.

UNA TEORÍA INCOMPLETA

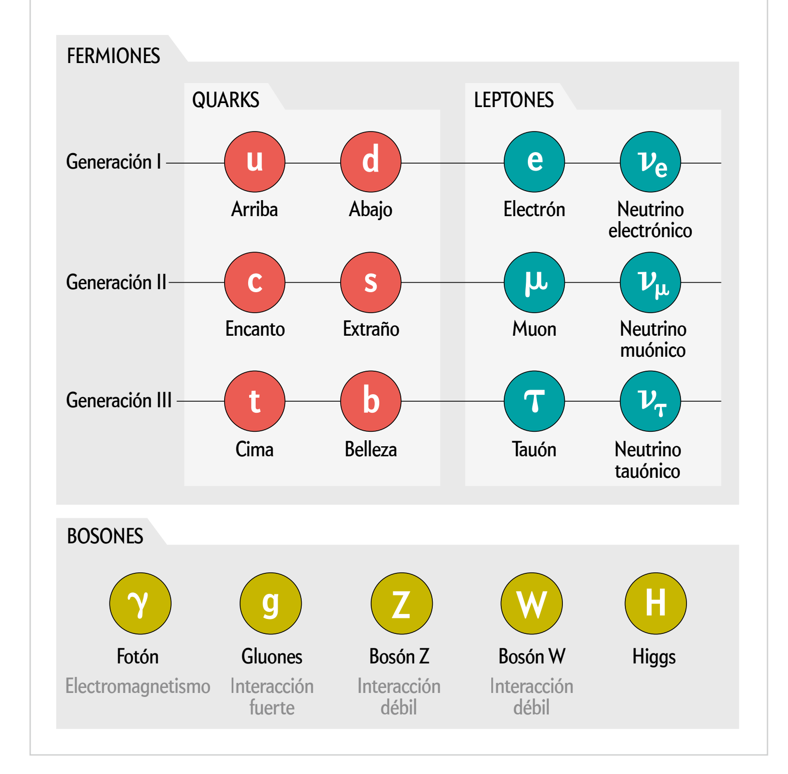
Hasta hoy, el modelo estándar ha descrito con rotundo éxito el comportamiento de las partículas elementales. Estas se dividen en dos grupos: quarks y leptones. De los primeros hay seis tipos, clasificados en tres familias, o «generaciones»: los quarks *arriba* (*u*) y *abajo* (*d*); *encanto* (*c*) y *extraño* (*s*); y *cima* (*t*) y *belleza* (*b*, también conocido como quark *fondo*, o *bottom*). Los quarks nunca se observan aislados, sino agrupados en las partículas que denominamos hadrones. Los hadrones «bellos» son, por tanto, aquellos que contienen quarks de tipo *b*. Los leptones son también seis y, al igual que sus compañeros, se agrupan en tres generaciones: el electrón y el neutrino electrónico; el muon y el neutrino muónico; y el tauón y el neutrino tauónico.

Los quarks *u* y *d* forman, junto con el electrón (todos de la primera familia), los átomos de la materia ordinaria. Las partículas de la segunda y tercera generación son más esquivas: para producirlas necesitamos aceleradores. Las fuerzas que actúan sobre todas ellas (obviando la gravedad, irrelevante a nivel subatómico) son el electromagnetismo, la interacción nuclear débil y la fuerte. Cada una de ellas se transmite, a su vez, por medio de otras partículas: el fotón media las interacciones electromagnéticas; los bosones *W* y *Z* propagan

LA TEORÍA VIGENTE

El modelo estándar

Las partículas e interacciones fundamentales conocidas (salvo la gravedad) quedan descritas por el modelo estándar. Este comprende seis tipos de quarks y otros tantos de leptones, los cuales componen la materia, así como varios bosones encargados de transmitir las interacciones. Con todo, los físicos cuentan con buenas razones para pensar que existen otras partículas subatómicas hasta ahora desconocidas.



la interacción débil; y los gluones transmiten las interacciones fuertes. La lista se completa con el bosón de Higgs, asociado al mecanismo que confiere masa a algunas partículas.

Sin embargo, los físicos sabemos que el modelo estándar no es una teoría completa. Aunque logra responder con gran precisión a ciertas preguntas, ante otras guarda silencio. En el ámbito de la cosmología, por ejemplo, no puede explicar por qué el universo se compone en su mayor parte de materia, cuando en la gran explosión materia y antimateria tendrían que haberse creado a partes iguales. Tampoco nos dice nada sobre la naturaleza de la materia oscura, la masa «extra» del universo que, aunque no podemos ver, sabemos que existe por el modo en que altera los movimientos de las estrellas y las galaxias. De hecho, el modelo estándar no incluye la gravedad, la fuerza de la naturaleza dominante a escalas cósmicas.

Pero también en el dominio subatómico existen problemas. La masa del bosón de Higgs es del mismo orden que la de los bosones *W* y *Z*; sin embargo, la teoría indica que debería ser 10.000 billones (10^{16}) de veces mayor. El modelo estándar tampoco explica la existencia de las tres familias de partículas. Estas parecen copias unas de otras, aunque separadas por una chocante jerarquía de masas; mientras que los quarks *u* y *d* son muy ligeros, la masa del *t* resulta casi igual a la de un átomo de oro. Sobre todas estas cuestiones, el modelo estándar no dice nada. Por tanto, y a pesar de todos sus éxitos, sabemos que solo puede ser una aproximación: la fachada visible de un edificio teórico mayor. El objetivo de LHCb, al igual que el de ATLAS, CMS y otros tantos experimentos en todo el mundo, es sacar a la luz las partículas e interacciones de esa teoría subyacente.

UN EXPERIMENTO DISTINTO

El Gran Colisionador de Hadrones, hogar del experimento LHCb, es un acelerador circular de 27 kilómetros de circunferencia en el que dos haces de protones circulan en sentidos opuestos a velocidades muy cercanas a la de la luz. En el interior de LHCb, los protones chocan más de 40 millones de veces por segundo. La gran cantidad de energía que se concentra en el punto de la colisión genera partículas de todo tipo; entre ellas, hadrones formados por quarks *b*. Estos existen durante un corto período de tiempo antes de desintegrarse en otras partículas, las cuales son detectadas por el experimento.

LHCb se encuentra a unos cuatro kilómetros del laboratorio principal del CERN, pegado a la valla que demarca el perímetro del aeropuerto de Ginebra. Los edificios de la superficie son de diseño funcional, en su mayoría heredados de un experimento anterior. Una gran ventana circular, la única concesión a la estética, permite a los pasajeros de los aviones observar el vestíbulo principal. En uno de ellos se halla la sala de control, donde los físicos vigilan día y noche el estado del experimento, situado a cien metros bajo tierra.

Aunque el detector es de tamaño modesto en comparación con los otros experimentos del LHC, tiene más de veinte metros de longitud y diez de altura. Su forma alargada contrasta con los diseños cilíndricos de ATLAS y CMS, y le permite registrar las señales de las partículas que se generan cerca de uno de sus extremos. Los hadrones bellos poseen una masa relativamente baja (del orden de 5 GeV, o gigaelectronvoltios, similar a la de un átomo de helio), por lo que son generados con un exceso de energía que tiende a impulsarlos desde el punto de la colisión hacia el interior del aparato. A pesar de su inusitada geometría alargada, LHCb tiene los mismos componentes que otros detectores; entre ellos, un gran imán, dispositivos para reconstruir la trayectoria de las partículas y calorímetros para medir su energía.

Con todo, algunos atributos de LHCb son únicos y han sido diseñados para estudiar la física de los hadrones bellos. Por ejemplo, un detector de silicio situado a 8 milímetros de los haces del LHC permite reconstruir la posición de las partículas con gran precisión; una herramienta útil, ya que los hadrones formados por quarks *b* suelen viajar una distancia de un centímetro antes de desintegrarse. El instrumento cuenta asimismo con un conjunto de contadores RICH, siglas en inglés de «sistema anular de imágenes Cherenkov», capaces de determinar qué tipo concreto de hadrón atraviesa el detector a partir de la luz que emiten muchos de ellos.

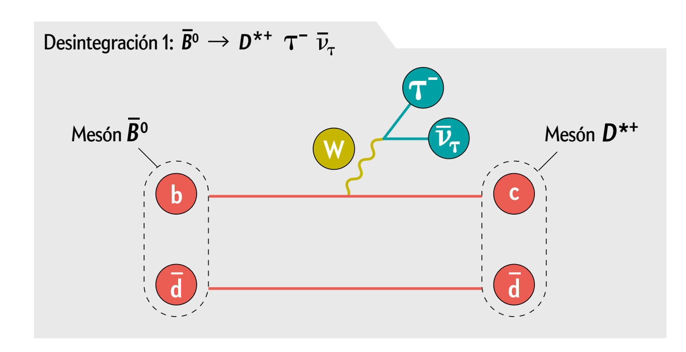
LA BÚSQUEDA DE NUEVA FÍSICA

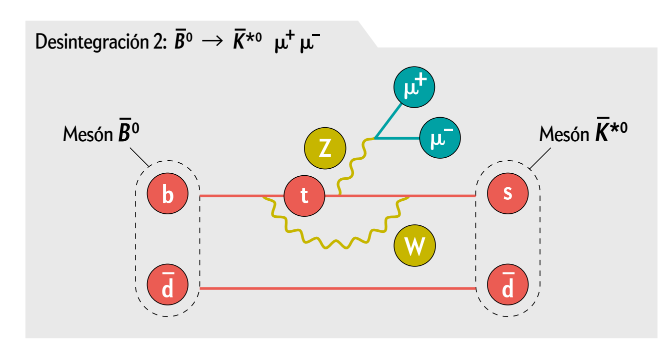
Durante la primera fase de operaciones, entre 2010 y 2012, se generaron en torno a un billón (10^{12}) de hadrones bellos en el

interior de LHCb. Estas partículas se desintegran de numerosas formas, algunas más interesantes que otras. Nuestro interés se centra en aquellos procesos que puedan delatar «nueva física»: comportamientos que el modelo estándar no puede explicar.

La mayoría de las propuestas que aspiran a extender el modelo estándar postulan la existencia de partículas más masivas que las que conocemos. Esto convierte al LHC en una herramienta ideal para buscar nueva física, ya que la elevada energía que se libera en las colisiones permite, en principio, crear partículas con una masa de hasta miles de GeV (como comparación, la masa del bosón de Higgs asciende a 125 GeV, mientras que la del protón es de unos 0,9 GeV). Los experimentos ATLAS y CMS han sido diseñados para producir tales partículas e identificarlas a partir de sus productos de desintegración. Sin embargo, existe una estrategia alternativa: inferir su existencia a partir de los efectos «virtuales» que las nuevas partículas pueden inducir en las desintegraciones de las partículas ordinarias.

Para entender el concepto de partícula virtual hemos de recurrir a los diagramas de Feynman (*véanse los esquemas inferiores*). Hacia 1950, el célebre Richard Feynman concibió estos diagramas como método para visualizar las interacciones entre partículas y como herramienta para calcular la probabilidad de que una desintegración se produzca de un modo u otro. A continuación examinaremos dos posibles formas en las que puede desintegrarse el mesón $\bar{B}^0$ (pronunciado «*B* cero barra»), compuesto por un quark *b* y un antiquark *d* (representado por $\bar{d}$ en la figura).





En estos diagramas el tiempo corre de izquierda a derecha. En el primer caso, el mesón $\bar{B}^0$ se desintegra en un mesón D^{*+} (compuesto por un quark *c* y un antiquark *d*), un tauón (τ^-) y un antineutrino tauónico ($\bar{\nu}_\tau$). Este proceso se escribe $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+}\tau^-\bar{\nu}_\tau$. La segunda desintegración, $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0}\mu^-\mu^+$, produce un mesón $\bar{K}^{*0}$ (compuesto por un quark *s* y un antiquark *d*), un muon (μ^-) y un antimuón (μ^+). La conservación de la energía y la equivalencia entre masa y energía, descrita por la famosa ecuación $E = mc^2$, implican que las partículas generadas en la desintegración han de tener una masa total menor que la del mesón $\bar{B}^0$. Esa diferencia de masas se transforma en la energía cinética de los productos de desintegración.

Fijémonos ahora en lo que sucede en el interior de cada diagrama. En el primer caso, aparece un bosón *W* en el punto en que el quark *b* se transforma en un quark *c*. Este bosón se desintegra después en un tauón y en un antineutrino tauónico. Lo sorprendente es que el bosón *W* es unas 16 veces más masivo que el mesón $\bar{B}^0$ original. ¿No viola esto la conservación de la energía? Según la mecánica cuántica, este tipo de violaciones están permitidas siempre que duren un tiempo lo suficientemente breve. En tales casos decimos que el bosón *W* es «virtual». Si nos fijamos en la segunda desintegración, vemos que es más compleja: incluye un bucle cerrado y tres vértices de interacción. Además de un bosón *W*, intervienen un quark *t* y un bosón *Z*, ambos virtuales y mucho más masivos que el mesón inicial. Las partículas virtuales pueden parecer un truco sacado de la manga, pero sus predicciones se han demostrado correctas una y otra vez. De hecho, fueron ellas las que, en su día, permitieron inferir la existencia de los quarks *c* y *t* y efectuar las primeras estimaciones de su masa.

Los diagramas que hemos descrito hasta ahora no muestran más que dos entre una infinidad de posibilidades en que puede desarrollarse la desintegración del mesón $\bar{B}^0$. Cabe imaginar muchas otras, algunas con partículas que nunca hemos visto enlazando los vértices internos o incluso dando lugar a vértices de interacción nunca antes observados. Las reglas de la mecánica cuántica nos dicen que el proceso que observamos en la naturaleza es la suma de todas las contribuciones de todos los diagramas posibles. Los diagramas más simples, como los mostrados aquí, suelen contribuir con un peso relativo mayor. Pero todas las posibilidades cuentan, por lo que afectan a las tasas finales de desintegración. En otras palabras, incluso cuando una partícula bien descrita por el modelo estándar se desintegra en otras también incluidas en el modelo estándar, los efectos virtuales de partículas hasta ahora desconocidas pueden llegar a influir en el proceso. Por tanto, si los resultados experimentales difieren de las predicciones basadas únicamente en el modelo estándar, sabremos que debe haber algo más en la naturaleza.

Este sencillo principio es el que se halla tras el diseño de LHCb. Y dado que aquí las nuevas partículas intervienen como participantes virtuales, su masa no está limitada por la energía liberada por el acelerador. En principio, estudiar los procesos adecuados con la precisión suficiente nos permitiría observar el efecto de partículas muy masivas que no pueden ser creadas ni detectadas por experimentos como ATLAS y CMS.

GRIETAS EN EL MODELO ESTÁNDAR

Quienes trabajamos en LHCb hemos visto indicios de que quizá no todo sea tan sólido como sugiere el modelo estándar. Las pistas provienen de varias medidas, pero todas ellas comparten características comunes. Es importante enfatizar que, con más datos y con una mejor comprensión teórica de estos procesos, tal vez acabemos concluyendo que el modelo estándar sí explica a la perfección los datos experimentales. En todo caso, estos primeros indicios ilustran cómo podrían aparecer y crecer las primeras grietas en la teoría vigente.

Uno de los procesos que han llamado nuestra atención es la desintegración $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+}\tau^-\bar{\nu}_\tau$ y la posible violación de una ley conocida como «universalidad leptónica». En el modelo estándar, el bosón *W* tiene la misma probabilidad de desinte-

grarse en un tauón y su correspondiente antineutrino que en los miembros homólogos de la familia del electrón o del muon (hay una minúscula diferencia debida a las distintas masas del tauón, el muon y el electrón). En otras palabras: las reglas de desintegración del bosón *W* son las mismas para todos los leptones. Sin embargo, tras contabilizar las desintegraciones de cada tipo, descontar los procesos que pueden falsear las señales y tener en cuenta que no observamos todos los procesos que en realidad se producen, hemos hallado que los hadrones bellos parecen desintegrarse en tauones con una frecuencia mayor de lo que predice el modelo estándar.

Estos resultados no son aún concluyentes. La discrepancia observada presenta una significancia estadística de dos desviaciones estándar, o dos sigmas, una magnitud relacionada con la incertidumbre inherente a nuestros datos. Debido a las fluctuaciones estadísticas, las anomalías de una sigma son muy frecuentes en ciencia, y los físicos solo comienzan a arquear las cejas cuando se enfrentan a una desviación de tres sigmas. El umbral comúnmente aceptado para proclamar el descubrimiento de una nueva partícula o afirmar que una predicción es incorrecta asciende a cinco sigmas. Por tanto, nuestra discrepancia de dos sigmas no parece tan relevante... a menos que comencemos a mirar lo que ocurre en otros experimentos.

La exquisita sensibilidad de LHCb y sus halagüeñas perspectivas de mejora resultan innegables. No sabemos si la senda para descubrir nueva física será larga o corta, pero estamos avanzando en la dirección correcta

Varios grupos han estado investigando estas violaciones de universalidad leptónica en Belle y BaBar, dos experimentos sobre hadrones bellos en Japón y California, respectivamente, que estuvieron tomando datos durante la primera década del milenio. Sus resultados también apuntan a una predilección por la desintegración en tauones en el mismo proceso y en otros similares. Además, en LHCb hemos efectuado otras pruebas adicionales sobre la violación de la universalidad leptónica y hemos seguido hallando que los tauones se generan con mayor facilidad de lo que deberían. Si incluimos todos estos resultados, la discrepancia asciende a cuatro sigmas. Se trata de una de las desviaciones más interesantes observadas hasta ahora en física de partículas, y plantea un serio problema para el modelo estándar.

¿Qué puede estar pasando? Al respecto se han propuesto varias ideas. Una de ellas postula la existencia de un bosón de Higgs adicional dotado de carga eléctrica. El bosón de Higgs no respeta la universalidad leptónica, ya que se desintegra de forma preferente en partículas más masivas, por lo que favorecería la producción de tauones. Sin embargo, las discrepancias que observamos no acaban de encajar con las teorías más sencillas que predicen bosones Higgs extra. Una explicación más exótica sería un leptoquark, una partícula hipotética que permitiría las interacciones entre leptones y quarks. Por último, todo podría deberse a un efecto experimental que enmascarase las señales. Para poner en orden estas posibilidades necesitamos resultados más precisos. Estos llegarán en los próximos años, tanto de LHCb como del experimento de segunda generación Belle II, que comenzará a operar muy pronto.

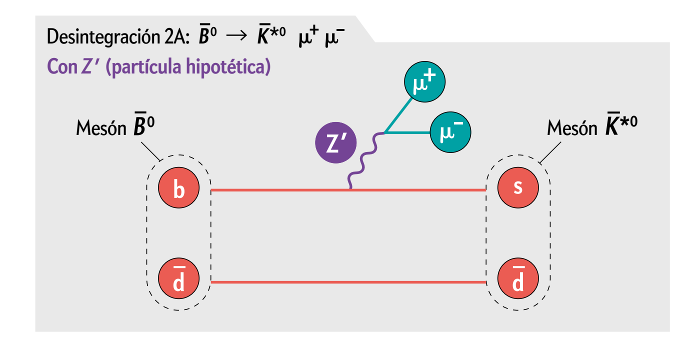
El siguiente indicio de nueva física proviene de la desintegración $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0}\mu^-\mu^+$. Este proceso es excelente para buscar nueva física por dos razones. En primer lugar, la presencia del bucle en el diagrama de Feynman indica que hace falta una carambola para que esta desintegración tenga lugar en el modelo estándar; sin embargo, la mediación de nuevas partículas podría elevar la probabilidad del proceso, lo que a su vez daría pistas sobre la existencia de tales partículas. Por otro lado, en este caso hay varias propiedades que podemos medir: la tasa de desintegración, así como la energía y los ángulos en los que salen despedidas las partículas generadas. Estos datos pueden combinarse en ciertos «observables»: cantidades físicas que —si bien no siempre resultan sencillas de visualizar— podemos comparar directamente con las predicciones del modelo estándar.

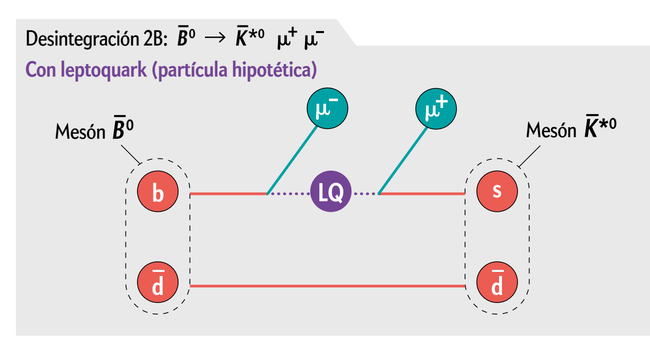
En muchos sentidos, la desintegración $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0}\mu^-\mu^+$ constituye el ejemplo perfecto de la física de quarks *b*, lo que explica la cantidad de artículos que se han escrito sobre ella incluso antes de que el LHC empezase a funcionar. Lo único de lo que carece este proceso es de una nomenclatura decente, ya que los nombres de los observables asociados resultan algo decepcionantes. Uno de ellos es el llamado P_5' («P5 prima»), el héroe de nuestra historia [*véase* «¿Indicios de nueva física en el LHC?», por Joaquim Matias; Investigación y Ciencia, agosto de 2017].

El análisis de P_5' comenzó con los primeros datos de LHCb, cuando estudiamos una variedad de desintegraciones clasificadas según la dirección y la energía de los muones emitidos. En algunos casos, hallamos discrepancias significativas con respecto a las predicciones del modelo estándar. Tras aquello, la comunidad científica esperó con avidez nuevos resultados basados en más datos. Estos llegaron hace dos años. ¿Desaparecería la anomalía o seguiría estando allí? El efecto persistió. La desviación ascendía a unas 3,5 sigmas; no lo suficiente como para brindar con champán, pero sí digna de ser tomada en serio. La excitación aumentó cuando otros observables en procesos similares también mostraron anomalías. Al combinar todos los resultados, la discrepancia ascendía a 4,5 sigmas: algo imposible de pasar por alto.

Se han propuesto varios modelos para explicar los datos. Los leptoquarks siguen siendo una posibilidad; otra es la existencia de una partícula llamada *Z′*, un primo exótico y más masivo del bosón *Z* (*véanse los esquemas de la página siguiente*). Por supuesto, estas especulaciones deben respetar todos los resultados experimentales conocidos. Por ejemplo, la masa y el comportamiento de las nuevas partículas han de ser tales que no hayan podido observarse directamente en ATLAS ni en CMS.

Se han propuesto varios escenarios teóricos que cumplen con estos requisitos. Pero hemos de ser cuidadosos. Algunos físicos creen que las predicciones del modelo estándar no se han calculado con la suficiente precisión, lo que podría hacer que la verdadera discrepancia fuese mucho menor de lo que





aparenta. En particular, los efectos mundanos pero difíciles de calcular de las interacciones fuertes podrían ser mayores de lo esperado. La buena noticia es que podemos poner a prueba tales hipótesis con nuevas mediciones. Ello exige análisis detallados y más datos, pero estos llegan continuamente.

El último enigma se refiere a un par de mediciones que guardan mucho en común con algunas de las que ya hemos mencionado, pero que bien podrían convertirse en las más interesantes de todas. En este caso analizamos un cociente, llamado R_{K^*}, que compara la frecuencia del proceso $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0}\mu^-\mu^+$ con la de uno similar pero en el que, en lugar de producirse una pareja muon-antimuón, se emite un par electrón-positrón. También hemos examinado el cociente R_K, que compara desintegraciones en las que el mesón $\bar{K}^{*0}$ se sustituye por otro hadrón llamado K. Se trata de nuevo de un test sobre la universalidad leptónica, solo que centrado en las dos primeras generaciones de partículas.

En el marco del modelo estándar, la predicción de estos cocientes es automática: dado que el proceso apenas distingue entre electrones y muones, las respectivas tasas de desintegración deberían ser las mismas, por lo que tanto R_K como R_{K^*} tendrían que valer aproximadamente 1. Además, en este caso, las medidas experimentales resultan menos complejas que las usadas en los otros tests sobre universalidad leptónica. Se trata de una prueba extremadamente limpia de la validez del modelo estándar.

Un primer análisis de R_K arrojó un valor de 0,75 con una precisión que implicaba una discrepancia de 2,6 sigmas. Dicho resultado hizo que todos estuviésemos pendientes del valor relativo a R_{K^*}, el cual publicamos finalmente el año pasado. La espera ha merecido la pena, ya que R_{K^*} ha mostrado el mismo tipo de comportamiento. El valor obtenido es de 0,69, con una discrepancia de 2,5 sigmas con respecto a la predicción del modelo estándar. Aunque es posible que se trate de una fluctuación estadística, la observación de una anomalía muy similar en dos procesos distintos y la relativa sencillez del test han hecho que los resultados generen gran expectación.

Si estas anomalías se confirman, indicarían que hay una ley de la naturaleza que favorece las desintegraciones en las que se generan electrones frente a aquellas en las que se producen muones. Los leptoquarks y los bosones Z' constituyen las opciones predilectas para explicar el fenómeno. De hecho, parece que lo que ocurre es que se generan menos muones de lo esperado, mientras que la producción de electrones se acercaría más a las predicciones del modelo estándar. De ser el caso, el mismo mecanismo responsable de las anomalías en R_K y R_{K^*} daría cuenta de las discrepancias en P_5'. Algunos investigadores han propuesto modelos que también solucionarían el rompecabezas de $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+}\tau^-\bar{\nu}_\tau$. Con todo, concebir una respuesta que explique todas las discrepancias a la vez no parece tarea fácil.

Pronto sabremos más. En estos momentos estamos analizando la siguiente tanda de datos, lo que mejorará los resultados sobre R_K y R_{K^*}. Si las discrepancias crecen, estas anomalías saltarán a la fama; si disminuyen, habremos de seguir buscando.

EL LEMA DE GALILEO

Los resultados que hemos mencionado aquí no son más que un ejemplo de las numerosas mediciones interesantes que pueden hacerse en física de hadrones bellos. Llenan de ilusión a muchos investigadores, pero quienes llevan tiempo en esta profesión han visto aparecer y desaparecer anomalías similares en otras ocasiones. Por el momento, solo podemos tomar más datos y esperar.

¿Qué significaría que uno de estos resultados pasase de «anomalía interesante» a «clara contradicción con las predicciones del modelo estándar»? Desde luego, sería el acontecimiento más importante en física de partículas en muchas décadas, pues abriría una ventana a fenómenos que exceden nuestra comprensión actual de las leyes de la naturaleza. Llegados ahí, tendríamos que averiguar qué falla en el modelo estándar. Según qué partícula encontremos (un leptoquark, un bosón Z', un higgs exótico o algo completamente distinto) sus efectos deberían observarse en otras desintegraciones de hadrones bellos. Y la nueva partícula, a menos que su masa resulte demasiado elevada, tal vez podría ser detectada directamente en ATLAS, CMS u otro experimento.

Sea como fuere, la exquisita sensibilidad de LHCb y sus halagüeñas perspectivas de mejora resultan innegables. No sabemos si la senda para descubrir nueva física será larga o corta, pero estamos avanzando en la dirección correcta. A fin de cuentas, fue Galileo quien recomendó «medir lo medible, y hacer medible lo que no lo es». No podríamos encontrar un lema mejor para LHCb. ■

PARA SABER MÁS

A challenge to lepton universality in *B*-meson decays. G. Ciezarek et al. en *Nature*, vol. 546, págs. 227-233, junio de 2017.
Flavour changing neutral currents making and breaking the standard model. F. Archilli et al. en *Nature*, vol. 546, págs. 221-226, junio de 2017.
Página web del experimento LHCb: **lhcb-public.web.cern.ch**

EN NUESTRO ARCHIVO

Más allá del modelo estándar de la física. Gordon L. Kane en *IyC*, agosto de 2003.
Partículas bellas de materia y antimateria. Alberto Ruiz Jimeno en *IyC*, diciembre de 2008.
¿Indicios de nueva física en el LHC? Joaquim Matias en *IyC*, agosto de 2017.

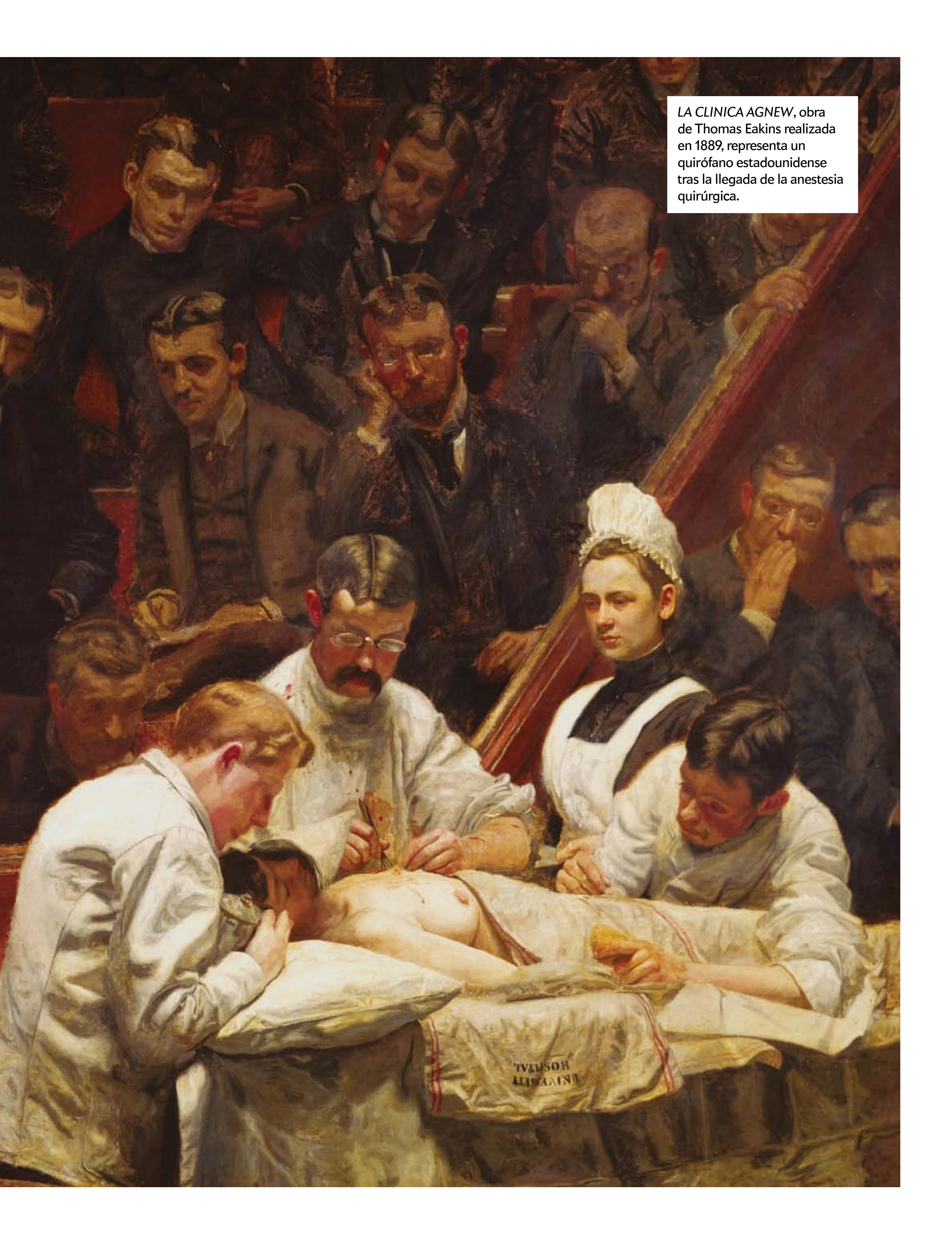


HISTORIA DE LA MEDICINA

CUANDO LA ANESTESIA TRANSFORMÓ LA CIRUGÍA

Hasta mediados del siglo XIX, las operaciones entrañaban enorme riesgo y dolor para los pacientes. Fue entonces cuando dos cirujanos convirtieron esa antigua carnicería en ciencia

Lindsey Fitzharris



LA CLINICA AGNEW, obra de Thomas Eakins realizada en 1889, representa un quirófano estadounidense tras la llegada de la anestesia quirúrgica.

Lindsey Fitzharris, doctora en historia de la ciencia por la Universidad de Oxford, es autora de un popular blog divulgativo y varios vídeos dedicados a mostrar aquellos hechos poco conocidos que se hallan detrás de la historia de la medicina. El pasado octubre publicó su primer libro, *The butchering art* («El arte de la carnicería»). También ha escrito para *The Lancet, New Scientist* y otras revistas.



Cuando, pocos días antes de la Navidad de 1846, el veterano cirujano Robert Liston se detuvo frente a quienes ocupaban el nuevo quirófano del Colegio Universitario de Londres, sostenía en sus manos una botella con un líquido claro. Se trataba de éter, que podría acabar con la necesidad de operar a gran velocidad. Si satisfacía las demandas de los estadounidenses, la naturaleza de la cirugía iba a cambiar para siempre. Aun así, Liston no podía dejar de preguntarse si el éter no era solo otro producto del curanderismo, con poca o ninguna aplicación útil en la cirugía.

La tensión era elevada. Quince minutos antes de que Liston entrara en el quirófano, su colega William Squire se había dirigido a la concurrida multitud de espectadores y había pedido la ayuda de un voluntario. Un nervioso murmullo llenó la habitación. En la mano de Squire había un aparato semejante a un narguile árabe, hecho de cristal, con un tubo de goma y una mascarilla en forma de campana. El dispositivo lo había fabricado Peter, tío de Squire y farmacéutico de Londres, y había sido utilizado por el cirujano dental James Robinson para extraer una muela tan solo dos días antes. A los asistentes les pareció extraño. Nadie se ofreció voluntario para que lo ensayaran con él.

Desesperado, Squire ordenó finalmente al portero que se sometiera a la prueba. No fue una buena elección, ya que, como escribió el cirujano jubilado Harold Ellis, era «gordo, pletórico y sin duda tenía un hígado muy acostumbrado al alcohol fuerte». Squire colocó cuidadosamente el aparato sobre el rostro carnoso del hombre. Después de unas pocas inspiraciones profundas de éter, el portero saltó de la mesa y salió corriendo de la habitación, mientras maldecía al cirujano y a los espectadores con toda la fuerza de sus pulmones.

No hubo más ensayos. Pero el inevitable momento había llegado.

EL FINAL DE LA AGONÍA

A las dos y veinticinco de la tarde, Frederick Churchill, un mayordomo de 36 años de la calle Harley, fue traído en una camilla. El joven padecía osteomielitis crónica en la tibia, una infección ósea bacteriana que había provocado que su rodilla derecha se hinchara y se doblara intensamente. En una primera operación, tres años antes, se le abrió la zona inflamada. Tal y como se describía en un artículo publicado en 1915 en *American Journal of Surgery*, «se le retiraron varios cuerpos laminados de forma irregular» y del tamaño de entre un guisante y un haba grande. El 23 de noviembre de 1846, Churchill regresó al hospital. Pocos días después, Liston hizo una incisión e introdujo una sonda en la rodilla. Con sus manos sin lavar, palpó el hueso para asegurarse de que se conservaba, ordenó lavar con agua caliente la zona descubierta y después secarla, e indicó que se permitiera descansar al paciente. Durante los siguientes días, el estado de salud de Churchill empeoró. Pronto empezó a sufrir un dolor agudo que irradiaba desde la cadera hasta los dedos de los pies. Este se repitió tres semanas más tarde, tras lo cual Liston decidió amputar la pierna.

Se trasladó a Churchill al quirófano en una camilla y fue colocado en una mesa de madera. Dos ayudantes se colocaron cerca por si acaso el éter no hacía efecto y tuvieran que inmovilizar

EN SÍNTESIS

Hasta mediados del siglo XIX, las operaciones significaban casi con total seguridad una agonía para los pacientes.

Con la utilización del éter como anestésico general, se realizaron más intervenciones quirúrgicas, pero se incrementaron las tasas de infecciones y de complicaciones.

Tras ser testigo de los inicios de la anestesia quirúrgica, Joseph Lister, por entonces joven estudiante de medicina, comenzó a buscar un modo de operar sin poner al paciente en peligro tras la intervención.

PÁGINAS ANTERIORES: GEOFFREY CLEMENTS, GETTY IMAGES (*fotografía*)

al aterrorizado paciente mientras Liston le amputaba la pierna. A una señal de Liston, Squire dio un paso al frente y colocó la mascarilla sobre la boca de Churchill. Pocos minutos después, el mayordomo estaba inconsciente. A continuación, Squire puso un pañuelo empapado en éter sobre la cara del paciente para asegurarse de que no se despertara durante la operación. Asintió con la cabeza y dijo a Liston: «Creo que funcionará, señor».

Liston abrió un estuche grande y sacó un cuchillo de amputación recto inventado por él mismo. Esa tarde, un observador entre el público habría notado que ese instrumento debía de estar entre sus preferidos por las pequeñas muescas que tenía en el mango, que indicaban el número de veces que lo había usado antes. Liston probó con la uña del pulgar el filo de la hoja. Satisfecho con el resultado, dio instrucciones a su ayudante William Cadge para que «cogiera la arteria» y se volvió hacia la multitud.

«Ahora, señores, cronométrenme», gritó. Se oyeron una serie de clics cuando los relojes de bolsillo fueron sacados de los chalecos y abiertos de golpe.

Liston se volvió hacia el paciente y le sujetó el muslo con su mano izquierda. Con un rápido movimiento, hizo una profunda incisión sobre la rodilla derecha. Uno de sus ayudantes aplicó rápidamente un torniquete alrededor de la pierna para detener el flujo de sangre mientras Liston pasó los dedos por debajo del colgajo de piel para tirar de ella. El cirujano hizo otra serie de rápidas maniobras con su cuchillo y dejó expuesto el fémur. A continuación, hizo una pausa.

Cuando se enfrentan al hueso descubierto, muchos cirujanos se sienten intimidados por tener que serrarlo. Unos años antes, Charles Bell había aconsejado a sus estudiantes que serraran lenta y cuidadosamente. Incluso aquellos que están acostumbrados a hacer incisiones pueden perder los nervios al tener que amputar una pierna. En 1823, Thomas Alcock declaró que la humanidad «se estremece ante la idea de que hombres sin preparación en el uso de otras herramientas que no sean el cuchillo y el tenedor que utilizan diariamente presuman de operar con sus deshonestas manos a sus dolientes criaturas». Recordó una espeluznante historia sobre un cirujano cuya sierra se había quedado tan incrustada en el hueso que no se movía. Su contemporáneo William Gibson aconsejaba que los novatos practicaran con un trozo de madera para evitar esos escenarios de pesadilla.

Liston entregó el cuchillo a uno de los ayudantes quirúrgicos, quien, a su vez, le alargó una sierra. El mismo asistente separó los músculos, que más adelante serían utilizados para dar forma al muñón del amputado. El cirujano hizo media docena de incisiones antes de que la pierna cayera en las manos que tenía preparadas un segundo ayudante, quien rápidamente la arrojó a una caja llena de serrín al lado de la mesa de operaciones.

Mientras tanto, el primer ayudante aflojó el torniquete para hacer visibles aquellas arterias y venas que había que ligar. Habitualmente, en una amputación había que realizar once ligaduras. Liston ligó la arteria principal con un nudo cuadrado y a continuación se ocupó de los vasos pequeños, que sostuvo uno a uno mediante una pinza de garfio llamada tenáculo. Su ayudante aflojó de nuevo el torniquete mientras Liston cosía el resto del tejido.

Liston tardó 28 segundos en amputar la pierna derecha de Churchill, quien durante ese tiempo ni se movió ni gritó. Cuando minutos más tarde se despertó y preguntó cuándo iba a comenzar la operación, la contestación la obtuvo al ver su muñón elevado, para solaz de los espectadores, asombrados de lo que acababan de presenciar. Con la cara enrojecida por la excitación del momento, Liston anunció: «Señores, este truco yanqui le ha propinado un golpe al mesmerismo vacuo».

La era de la agonía se acercaba al fin.

Dos días después, el cirujano James Miller leyó una apresurada carta de Liston a sus estudiantes de medicina de Edimburgo anunciando en términos entusiastas que «una nueva luz brillaba en la cirugía». Durante los primeros meses de 1847, cirujanos y celebridades curiosas visitaban los quirófanos para ser testigos del milagro del éter. Todos, desde Sir Charles Napier, gobernador colonial de lo que ahora es una provincia de Pakistán, hasta el príncipe Jerónimo Bonaparte, el hermano pequeño de Napoleón I, fueron a comprobar los efectos del éter con sus propios ojos.

> «La historia de la medicina no ha ofrecido nada parecido al éxito perfecto alcanzado por el empleo del éter»

Se acuñó el término «eterización» y su uso en cirugía fue celebrado en los periódicos de todo el país. Se difundieron noticias sobre sus poderes. «La historia de la medicina no ha ofrecido nada parecido al éxito perfecto alcanzado por el empleo del éter», proclamó el *Exeter Flyng Post*. El éxito de Liston fue pregonado asimismo por el *People's Journal* de Londres: «Oh, qué deleite siente el corazón [...] ante el anuncio de este noble descubrimiento, que tiene el poder de calmar la sensación de dolor y de eliminar de la vista y la memoria todos los horrores de una operación [...]. HEMOS CONQUISTADO EL DOLOR».

EL ENEMIGO INVISIBLE

Para el triunfo de Liston con el éter también fue importante la presencia ese día de un joven llamado Joseph Lister, sentado en silencio en el fondo del quirófano. Deslumbrado y cautivado por el hecho tan dramático que acababa de presenciar, el entonces aspirante a médico abandonó el quirófano de la calle Gower convencido de que la profesión que había elegido iba a cambiar para siempre. Él y sus compañeros ya no tendrían que ver por más tiempo una escena «tan terrible y angustiosa» como la presenciada por William Wilde, un estudiante de cirugía que asistió a regañadientes a la extirpación sin anestesia del globo ocular de un paciente. Tampoco sentirían la necesidad de escapar, como la que se adueñaba del cirujano John Flint South cuando los gritos de los que estaban siendo operados se hacían intolerables.

No obstante, mientras Lister se abría paso entre la multitud de personas que se estrechaban las manos y se felicitaban por

haber elegido la medicina como profesión y por esta importante victoria, pensaba que el dolor no era el único obstáculo que superar para que la cirugía triunfara.

Sabía que la amenaza de una infección inminente había impuesto sus límites a la cirugía desde hacía miles de años. Operar el abdomen, por ejemplo, tenía consecuencias mortales casi siempre por este motivo. El tórax quedaba también fuera de su alcance. La mayoría de las veces, mientras los médicos trataban las afecciones internas —de ahí el término «medicina interna», que aún se utiliza—, los cirujanos atendían las externas: heridas, fracturas, úlceras cutáneas, quemaduras.

Solo en las amputaciones, el bisturí del cirujano penetraba profundamente en el interior del cuerpo. Sobrevivir a una operación era una cosa. Llegar a recuperarse por completo, sin complicaciones, era otra.

Lo que ocurrió fue que, en las dos décadas que siguieron a la popularización de la anestesia, los resultados obtenidos por la cirugía empeoraron. Confiados en poder operar sin causar dolor, los cirujanos estaban más dispuestos que nunca a empuñar el bisturí, lo que aumentó las infecciones y el choque séptico. En el Hospital General de Massachusetts, por ejemplo, las tasas de mortalidad por amputaciones pasaron del 19 por ciento, antes del éter, al 23 por ciento, después de él. Los quirófanos estaban más sucios que nunca a medida que aumentaban las operaciones. Los cirujanos aún no conocían la causa de las infecciones, por lo que operaban a un paciente detrás de otro utilizando el mismo instrumental sin lavar. Cuanto más ocupado estaba un quirófano, menos probabilidades había de que se tomaran las medidas higiénicas más elementales. De entre los que pasaron por el bisturí, muchos murieron, o nunca se recuperaron por completo y continuaron su vida como discapacitados e inválidos. El problema era universal. Los pacientes de todo el mundo temieron aún más la palabra «hospital», mientras que los cirujanos más hábiles dudaban de su propia destreza.

Con el triunfo de Robert Liston con el éter, Lister acababa de ser testigo de la eliminación del primero de los dos principales obstáculos que impedían obtener buenos resultados en una cirugía, a saber, el dolor. Inspirado por lo que había presenciado la tarde del 21 de diciembre, aunque consciente de los peligros que aún complicaban su profesión, Joseph Lister, extraordinariamente perspicaz, emprendió muy pronto un camino que seguiría el resto de su vida: la búsqueda de las causas y la naturaleza de la infección posquirúrgica y de su solución. A la sombra de uno de los últimos grandes matarifes de la profesión, otra revolución quirúrgica estaba a punto de comenzar.

PARA SABER MÁS

Historical development of modern anesthesia. Daniel H. Robinson y Alexander H. Toledo en *Journal of Investigative Surgery*, vol. 25, n.º 3, págs. 141-149, junio de 2012.

Mangling the dead: Dissection, past and present. Lindsey Fitzharris en *Lancet*, vol. 381, págs. 108-109, 12 de enero de 2013.

Joseph Lister and the performance of antiseptic surgery. Michael Worboys en *Notes and Records*, vol. 67, n.º 3, págs. 199-209, 20 de septiembre de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Historia del dolor en occidente. Javier Moscoso en *MyC*, n.º 80, 2016.

por Kate Wong



LA SUMA DE LAS PARTES: La reconstrucción de los fragmentos del cráneo de Neo nos revela cómo era el rostro de *Homo naledi*.

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Nuestro primo Neo

Un nuevo esqueleto extraordinariamente completo del enigmático *Homo naledi* nos permite conocer, finalmente, su antigüedad



En 2015, Lee Berger, de la Universidad de Witwatersrand, en Johannesburgo, y su equipo causaron gran sensación al dar a conocer más de 1500 fósiles humanos correspondientes a unos 15 individuos, hombres y mujeres, jóvenes y mayores, descubiertos en Sudáfrica. Era uno de los conjuntos más ricos de fósiles humanos jamás hallado, recuperado en una cámara profunda de un sistema de cuevas llamado Rising Star, cerca de Johannesburgo. El equipo atribuyó los huesos a una nueva especie, *Homo naledi* [*véase* «El misterioso *Homo naledi*», por Kate Wong; Investigación y Ciencia, mayo de 2016]. Mostraba una curiosa mezcla de rasgos primitivos, como un cerebro diminuto, y rasgos más modernos, como unas piernas largas. Los científicos dedujeron que era un escalador hábil, capaz de caminar grandes distancias, y que sus congéneres habrían depositado sus muertos en esta cámara de difícil acceso.

Pero, a pesar de la enorme información que aportaron los fósiles, el descubrimiento se hizo quizá más conocido por lo que no revelaban los restos: su antigüedad.

Al final se ha identificado esta pieza tan esperada del rompecabezas. En dos artículos publicados en mayo de 2017 en *eLife*, el equipo concluye que los restos de *H. naledi* tienen entre 236.000 y 335.000 años de antigüedad, una fecha sorprendentemente reciente para una especie con un cerebro tan pequeño. Los investigadores también anunciaron el hallazgo de más fósiles de *H. naledi* en una segunda cámara de Rising Star. Entre ellos figuraba el esqueleto de un individuo masculino adulto que apodaron Neo, que significa «regalo» en el idioma local sesotho.

Estos hallazgos plantean preguntas enigmáticas sobre el origen y la evolución de nuestro género *Homo*. A pesar de la temprana edad de los fósiles, las características primitivas de *H. naledi* hacen que se lo relacione con miembros más remotos de nuestra familia, y se piensa que podría ser incluso un antepasado directo de *H. sapiens*.

Berger y sus colaboradores también señalan que las nuevas dataciones de *H. naledi* indican que vivió en un momento en el que nuestros antepasados construían complejas herramientas de piedra que se corresponderían con el Paleolítico medio. La mayoría de los yacimientos donde los arqueólogos las han descubierto no contienen fósiles humanos. Pero tradicionalmente los expertos han atribuido la fabricación de estos utensilios a seres humanos dotados de un gran cerebro. Sin embargo, si *H. naledi* vivió en esa época, como sugieren los autores, pudo también haber creado esas herramientas. En ese caso tendrá que reconsiderarse la idea de que el tamaño del cerebro determina la complejidad del comportamiento. El paleoantropólogo Mark Collard, de la Universidad Simon Fraser, en la Columbia Británica, piensa que hay una buena razón para hacerlo: «La historia de la paleoantropología está llena de suposiciones profundamente arraigadas que han sido refutadas por nuevos descubrimientos».

—*Kate Wong* es redactora de *Scientific American* especializada en evolución y ecología.

JOHN HAWKS, UNIVERSIDAD DE WITWATERSRAND, JOHANNESBURGO

por Cristian Saborido



Cristian Saborido es profesor de filosofía de la ciencia en la UNED.

¿Qué significa estar sano o enfermo?

Los debates de la filosofía de la medicina

La preocupación de los filósofos por la medicina es tan antigua como la propia filosofía. En las obras de los primeros pensadores, tanto occidentales como orientales, abundan las alusiones a los padecimientos del cuerpo, tomados estos como el propio objeto de estudio o como alegorías de los problemas morales y existenciales. Y también en los mismos comienzos de la medicina encontramos elementos propios de la filosofía de la medicina, tal y como puede observarse en el tratado *Sobre la medicina antigua* y otros textos del corpus hipocrático.

Pocas actividades humanas tienen más importancia para nosotros que la de (intentar) sanar. Esto no resulta sorprendente, pues todos somos, hemos sido o seremos en algún momento de nuestra vida enfermos. Es decir, todos experimentamos, de forma más o menos intensa y frecuente, la vivencia de la enfermedad. No es nada extraño, pues, que el ser humano se haya preocupado desde sus orígenes por identificar, prevenir y tratar de revertir aquellos estados corporales que consideraba molestos o peligrosos. Y tampoco sorprende que esta lucha contra la enfermedad haya desencadenado una reflexión acerca de lo que significa estar sano o enfermo.

En las últimas décadas, la filosofía de la medicina ha logrado un lugar prominente dentro de la filosofía de la ciencia. A la importancia enorme que desde hacía ya tiempo tenía la ética clínica (también llamada comúnmente bioética) se ha unido ahora el interés de numerosos filósofos por los aspectos metafísicos y epistemológicos más fundamentales de la teoría, investigación y práctica de la medicina. Así, la filosofía de la medicina podría definirse como la rama de la filosofía que se dedica al estudio de los conceptos, métodos e implicaciones de la medicina.

Una de las características más peculiares de este ámbito es su enfoque marcadamente transdisciplinar. La medicina supone una combinación de saberes teóricos y prácticos, *theoria cum praxi*, en términos clásicos. Además, esta combinación tiene un carácter inherentemente normativo. Al contrario de lo que ocurre con ciencias más básicas como ciertas ramas de la física o la biología, la medicina no se encarga solo de explicar determinados fenómenos, sino que es también una disciplina prescriptiva, es decir, un saber que propone una intervención en el mundo de acuerdo con ciertas ideas de lo que consideramos bueno o malo.

Ello se hace patente en el que es probablemente el debate central de la filosofía de la medicina: la discusión acerca de la definición de «salud» y «enfermedad». Al diferenciar entre individuos sanos y enfermos, la profesión médica establece una distinción entre estados somáticos o mentales «correctos» e «incorrectos». Así, lo sano se correspondería con los estados que nos gustaría tener y lo enfermo con los que queremos evitar.

En consecuencia, la forma de entender la distinción entre salud y enfermedad supone toda una reconsideración, ya no solo de nuestra forma de ser en el mundo, sino también de nuestros modelos e ideales. La misma práctica médica, sea esta del tipo que sea, presupone que es posible identificar unos ideales óptimos de funcionamiento que nos permitan decir que ciertos modos de vivir son indeseables y deben, por tanto, ser corregidos o, por lo menos, que sus efectos negativos deben ser paliados. En otras palabras, la medicina se basa en una distinción teórica previa entre lo saludable (bueno) y lo patológico (malo).

Para entender cómo se establece esa distinción, no podemos olvidar que la medicina es, ante todo, una práctica social institucionalizada. Si bien tiene implícito mucho conocimiento científico (es imposible comprender su progreso sin el avance de la ciencia y la tecnología), se desarrolla en el marco de un complejísimo entramado de actores: los pacientes, los profesionales que desempeñan su labor en el seno de instituciones médicas y la sociedad en su conjunto, que es, en último término, la que posibilita y sanciona toda



LA ENFERMEDAD, su vivencia y su tratamiento son cuestiones centrales para la ciencia, la filosofía y el arte. *The doctor*, Luke Fildes, 1887 (The Tate Britain, Londres).

WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

la red de atención sanitaria. La distinción entre lo sano y lo enfermo no parece, por tanto, que pueda establecerse sin tener en consideración, además de la dimensión puramente científica de la teoría médica, todos los aspectos ideológicos, culturales y personales de las sociedades en las que la medicina se practica.

Esta es la base de la que parte la concepción constructivista (también llamada normativista) de la enfermedad. Según teóricos como Lennart Nordenfelt, del Colegio Universitario Ersta Sköndal Bräcke en Estocolmo, las nociones de salud y de enfermedad no pueden desvincularse de nuestras valoraciones subjetivas. Esta distinción es, en último término, una construcción social: no hay forma de identificar un estado concreto con una enfermedad de un modo puramente objetivo o libre de valores. Ideas como «sufrimiento», «minusvalía» o «bienestar» son esenciales para nuestra interpretación de la salud y de la enfermedad, y están cargadas de valores subjetivos. La diferencia entre sanos y enfermos no sería más que una imposición política de unas personas sobre otras.

Frente a esa concepción, los teóricos naturalistas sostienen que sí hay formas de distinguir entre salud y enfermedad sin necesidad de apelar a la subjetividad de cada persona o colectividad. Así, se han propuesto diferentes definiciones que intentan identificar un estado enfermo con ciertos estados biológicos. Algunos autores, como James Lennox, de la Universidad de Pittsburgh, consideran que lo sano y lo enfermo se corresponde con valores objetivos, en el sentido de que es el propio organismo, a través de respuestas como el dolor o la incapacidad, el que «identifica» ciertos estados como incorrectos.

Otra visión naturalista es la que sostiene que la distinción entre lo sano y lo enfermo es simplemente una cuestión de comparación. Christopher Boorse, de la Universidad de Delaware, propone identificar lo enfermo con lo «anormal» en un sentido estadístico: lo sano se correspondería con el comportamiento biológico de la mayoría de los individuos de una clase de referencia, mientras que lo patológico no sería sino el comportamiento «fuera de la norma» de los individuos que no pueden desempeñar el tipo de funcionamiento característico del resto, con total independencia de la consideración que los individuos puedan tener con respecto a estas formas de funcionar en el mundo.

Tanto los enfoques constructivistas como los naturalistas han sido ampliamente criticados y revisados. También se han propuesto definiciones híbridas que intentan conjugar aspectos de ambas visiones. En cualquier caso, y sea cual sea la definición que se adopte, la distinción entre salud y enfermedad entraña importantes consecuencias para los debates que conforman la actual filosofía de la medicina.

Por ejemplo, nuestra consideración acerca de la salud tiene implicaciones para la discusión entre el reduccionismo y el holismo en la teorización del cuerpo humano: ¿es conveniente entender el objeto de la práctica de la medicina de una forma atomizada, es decir, enfocada al análisis y tratamiento de partes concretas, tal y como parece indicar el naturalismo? ¿O necesitamos un enfoque global que dé cuenta del conjunto del cuerpo humano y, quizá, también de los aspectos psicológicos y culturales de los individuos, lo que nos acercaría más al constructivismo?

Además, una demarcación de la frontera entre la salud y la enfermedad debe enfrentarse a las cuestiones más controvertidas de la metodología de la investigación médica y del papel de los ensayos clínicos. Según si se asume un enfoque constructivista o uno naturalista, la forma en la que se evalúan los medicamentos es problemática por diferentes razones. ¿Cómo demostrar la eficacia de un fármaco o tratamiento si asumimos con los constructivistas que no hay criterios objetivos acerca de lo que es saludable? ¿Las pruebas estadísticas que nos dan los ensayos clínicos son suficientes para aprobar un fármaco o tratamiento aun cuando no conozcamos en detalle el mecanismo por el cual este actúa con respecto a los estados corporales que los naturalistas identifican con lo sano y lo enfermo?

Otro asunto controvertido es el que nos remite al carácter especialmente problemático de las enfermedades mentales. Una definición de salud y enfermedad puramente naturalista parece ser muy limitada, mientras que la perspectiva constructivista puede abocarnos a una postura según la cual los trastornos mentales son únicamente productos culturales, algo que no todo el mundo está dispuesto a aceptar.

También es posible ver cómo la siempre polémica categorización de los tratamientos y terapias no convencionales (homeopatía, acupuntura, osteopatía, etcétera) se ve influida por la definición de salud y enfermedad que se adopte. ¿Hay algún criterio científico que nos permita demarcar las medicinas genuinas de los enfoques erróneos y de los meros fraudes?

Probablemente, la posición más razonable en estos debates sea una que permita conjugar las perspectivas personal (del paciente), profesional (del médico) y colectiva (del entorno social). La Organización Mundial de la Salud definía en 1946 la salud como «un estado de completo bienestar físico, mental y social». De esta forma, reconocía que los factores psicológicos y sociales eran determinantes para una concepción adecuada de lo sano y lo enfermo. Aunque esta definición ha sido cuestionada por muy distintas razones —por ejemplo, por su carácter excesivamente idealista—, sirve para subrayar que la filosofía de la medicina no puede ignorar, ni en su vertiente constructivista ni en la naturalista, ninguno de estos tres ámbitos: lo físico, lo mental y lo social. Todos son necesarios para dar con una definición adecuada de salud y de enfermedad.

En tanto saber que conjuga teoría y práctica, al tiempo que oscila entre el naturalismo y el constructivismo, la medicina se muestra como un ámbito particularmente complejo para la filosofía. No obstante, su estudio crítico es imprescindible para fundamentar las urgentes discusiones éticas y políticas que, en nuestras sociedades, determinan la forma en la que entendemos, identificamos y combatimos la enfermedad en todas sus variantes. IyC

PARA SABER MÁS

Health as a theoretical concept. C. Boorse en *Philosophy of Science*, vol. 44, n.º 4, págs. 542-573, 1977.
Health as an objective value. J. Lennox en *The Journal of Medicine and Philosophy*, vol. 20, págs. 499-511, 1995.
On the nature of health. L. Nordenfelt. Kluwer, 1995.
Introducción a la filosofía de la medicina. H. R. Wulff, S. A. Pedersen y R. Rosenberg. Triacastela, 2002.
Philosophy of medicine. Dirigido por F. Gifford. Elsevier, 2011.
Idee per il rinnovamento della medicina: Epistemologia, antropologia ed etica. M. Pennacchini. Società Editrice Universo, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Evolución y orígenes de la enfermedad. Randolph M. Nesse y George C. Williams en *IyC*, enero de 1999.
Historia de la medicina, una asignatura pendiente en la formación de los médicos. Jon Arrizabalaga en *IyC*, octubre de 2016.

por Elizabeth Griffin

Elizabeth Griffin es astrónoma del Observatorio del Consejo de Investigación Nacional de Canadá, en Victoria, y codirectora del Grupo de Interés para la Recuperación de Datos, de la Alianza de Datos de Investigación.



Rescatemos los datos antiguos

Si no actuamos pronto se perderá un conocimiento invaluable

A finales del siglo xix, los astrónomos empezaron a fotografiar estrellas mediante prismas y redes de difracción, y documentaron espectros de estrellas para conocer su composición. Tiempo después, estas placas fotográficas han servido para otro propósito: cartografiar la concentración de ozono en la estratosfera de esa época y dilucidar si son naturales ciertos cambios actuales en el agujero de la capa de ozono. Lo más difícil ha sido conseguir esas placas de vidrio. Lo sé porque pasé muchas semanas revisando colecciones en observatorios de todo el mundo.

¿Qué otros datos históricos podrían resultar útiles? Los ejemplos abundan. Los miles de cuadernos de bitácora registrados durante las travesías en barco de los siglos pasados son un regalo para el estudio de los patrones meteorológicos del presente. Las fotografías antiguas y actuales de los glaciares alarman al mundo y demuestran de manera indiscutible el cambio climático. Las historias clínicas registradas en polvorientas tarjetas perforadas, abandonadas a finales de 1950 y descifradas décadas después, han ayudado a mostrar cómo los niveles variables de colesterol predicen la aparición de una enfermedad ulterior.

Para configurar el futuro necesitamos examinar el pasado. Pero esa posibilidad se desvanece por la negligencia y los malentendidos. Pocos formatos de ese legado de información, se almacenen en placas de vidrio, papel, cintas viejas o disquetes, son de fácil acceso, así que, en la práctica, los datos que contienen están perdidos.

Las mediciones tomadas hoy, cada vez más complejas, como los macrodatos (*big data*), nos hablan solo del presente; las registradas hace mucho tiempo nos muestran cambios en el clima terrestre o los ecosistemas. Y los datos de pacientes de hace décadas pueden aportar conocimientos a las prácticas y políticas sanitarias actuales.

¿Por qué los científicos de todas las disciplinas no se apresuran por conservar los antiguos registros si son tan valiosos para estudiar las tendencias a largo plazo? Parte de la respuesta reside en la psicología humana. En una charla que impartí sobre la necesidad de convertir los datos de astronomía, casi perdidos, a formatos duraderos y fácilmente compartibles, un miembro de la audiencia cuestionó la labor: «Los datos modernos son mucho mejores», dijo.

No entendió la idea. Pocos quieren husmear en archivos mohosos en busca de un legado de información recogida con técnicas obsoletas. Sin embargo, esta estrategia proporciona datos que no se consiguen de otra forma. Es el momento oportuno para rescatarlos. A menudo los que los obtuvieron están todavía vivos y pueden informarnos sobre el contexto. Las técnicas para digitalizar numerosos tipos de registros son baratas y accesibles.



No obstante, la digitalización no logrará preservarlo todo. Por ejemplo, un epidemiólogo ha trazado la propagación del cólera en la península ibérica olfateando sobres. ¿Cómo? Durante siglos las oficinas de correos usaron vinagre para desinfectar el correo saliente de las ciudades contaminadas, y el olor se ha mantenido.

¿Qué se puede hacer, entonces? El Grupo de Interés para la Recuperación de Datos, que forma parte de la Alianza de Datos de la Investigación (RDA), ofrece directrices (go.nature.com/2pgzkfs) para guiar al investigador por las etapas de recuperación de información. Campos como la biodiversidad (rebind.bgbm.org), la vulcanología y la oceanografía han logrado grandes progresos en la conservación de datos antiguos. Pero resultará imposible salvar toda la información. Priorizar unos datos sobre otros significa buscar su potencial para arrojar luz sobre cuestiones que de otro modo no podrían resolverse.

Todo el mundo puede ayudar. El primer reto consiste en localizar los registros, fotografías y otros elementos, o tan solo reconocer su valor. Muchos llevan sin usarse una eternidad y están guardados en lugares casi olvidados. La segunda dificultad es verificar que los metadatos (como la fecha, la ubicación y las limitaciones de la medición) estén disponibles para que, cuando los datos se conviertan a formatos modernos, puedan asignarse con exactitud a un momento y un lugar.

Hallar recursos para estas tareas de recuperación suele entrañar dificultad. Los fondos son escasos e impredecibles, pero los entusiastas han conseguido subvenciones de instituciones, como la NASA, la Agencia Estadounidense para el Desarrollo Internacional o la Fundación Alemana de Investigación. Vale la pena extender numerosos tentáculos. Los archiveros universitarios pueden aportar su experiencia; y los grupos de ciencia ciudadana ya están movilizándose.

Un recurso subestimado son las historias de éxito. Cuando los investigadores oyen hablar de información antes ignorada que se ha rescatado y transformado en conocimientos modernos, son más proclives a reconocer sus posibilidades ocultas.

Pero debemos darnos prisa. Algunos datos están deteriorándose mientras escribo, otros ya no podrán recuperarse y los recuerdos de quienes pueden sacarles partido quizá no estén disponibles mucho más tiempo. IyC

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 545, pág. 267, 18 de mayo de 2017. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2017

Con la colaboración de nature

por Pere Castells



Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es colaborador del proyecto Gastrocultura Mediterránea.

La inulina

Su eclosión en gastronomía es inminente

La inulina ha irrumpido con fuerza en el panorama alimentario gracias a sus buenos informes nutricionales. Químicamente, engloba a una familia de polisacáridos de tipo fructano. Se halla presente en numerosos vegetales como la cebolla, el ajo y los espárragos, pero es de la raíz de la achicoria de donde suele extraerse, debido a que en este tubérculo se encuentra en concentraciones elevadas. También se obtiene del agave u otros vegetales, sobre todo en el continente americano.

En un artículo publicado por Kathy R. Niness, de Orafti Active Food Ingredients, en 1999 en *The Journal of Nutrition*, ya se constataba la importancia alimentaria de este grupo de polisacáridos. Se indicaba también que no se digieren en el tracto gastrointestinal superior, por lo que tienen un valor calórico reducido y estimulan el crecimiento de bifidobacterias intestinales.

En otro trabajo publicado en diciembre de 2014 en *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, Gertjan Schaafsma, asesor en alimentación, salud y seguridad, y Joanne L. Slavin, del Departamento de Ciencia de los Alimentos y Nutrición de la Universidad de Minnesota, revisaban las propiedades fisicoquímicas y el valor nutricional de la inulina. Concluyeron que es un ingrediente seguro y bien tolerado hasta una dosis de 20 gramos por día. También ratificaron los efectos directos sobre el intestino, incluida la acción prebiótica, absorción de minerales (calcio y magnesio) y secreción de hormonas de saciedad —este último aspecto reviste una gran importancia por su relación con posibles tratamientos contra la obesidad.

Y en un estudio publicado el año pasado en *Tecnología química* por Marco Lara Fiallos, de la Universidad Central de Ecuador, y otros colaboradores, se identificaba la importancia de la inulina en la producción alimentaria mundial, se resaltaba la variedad de sus aplicaciones potenciales y se subrayaba la necesidad de desarrollar técnicas de producción eficientes.

En el plano comercial sería mejor hablar de «inulinas», puesto que se distribuyen diversos tipos con diferente composición. Si bien la mayoría de polisacáridos de las inulinas son cadena larga (hidratos de carbono no digeribles y que no aportan dulzor) y el resto de cadena corta (de tipo azúcar, que aportan dulzor), la proporción de unos y otros varía de una inulina a otra. Cada una ofrece unas propiedades distintas. Las que son bajas en azúcares se emplean como sustitutos de texturizantes grasos, lo que permite mejorar la sensación en boca, la estabilidad y la aceptabilidad de los alimentos bajos en grasa. Las que contienen mayor porcentaje de azúcares, en cambio, pueden usarse a modo de edulcorantes.



CREMOSO de mandarina elaborado sin huevos ni leche.

CORTESÍA DE JORDI GUILLEM

En general, estos productos se están empleando en la cocina para obtener preparaciones espesadas. Pueden llegar a presentar una textura de tipo cera si la inulina utilizada está formada solo por hidratos de carbono de cadena larga, no digeribles.

Por sus posibilidades de aplicación en frío y en caliente, las inulinas ofrecen una versatilidad culinaria notable. Además, permiten obtener texturas similares a las derivadas de productos lácticos u ovoproductos, por lo que pueden usarse en dietas para veganos o intolerantes al huevo o la leche.

Una de las aplicaciones específicas de la inulina son los helados. En ellos promueve la retención de agua y confiere untuosidad, lo que impide el crecimiento de cristales de agua y permite disminuir la proporción de grasa. En pasteles y galletas puede utilizarse a modo de aglutinante. También se emplea como sustituto de grasas en elaboraciones cárnicas.

Uno de los primeros restaurantes que han apostado por la inulina ha sido el guipuzcoano Mugaritz, que la ha utilizado en diferentes elaboraciones como una *ganache* de chocolate con inulina. También el Celler de Can Roca, en Gerona, emplea inulina en elaboraciones como la *Gamba anémona*, donde explota la cremosidad que da este producto. Las cremas tradicionalmente asociadas a derivados del huevo y la leche pueden ahora realizarse sin estos ingredientes. Jordi Guillem ha elaborado un cremoso de mandarina solo con el cítrico, azúcar e inulina (los ingredientes se mezclan en frío, lo que permite conservar el frescor de la mandarina).

La confluencia de tan distintos atributos vaticina un futuro prometedor para la inulina. En el plano nutricional, como prebiótico. En el médico, para dietas bajas en calorías. Y en el gastronómico, para conservar aromas y sabores en frío y como sustituto de grasas y azúcares. Veremos pronto si se cumple este pronóstico.

COSMOLOGÍA

NUEVA LUZ SOBRE EL COSMOS OSCURO

HUELLA OSCURA: La manera en que se agrupan las galaxias en el universo actual depende de la influencia que han ejercido la materia y la energía oscuras a lo largo de la evolución cósmica. Esta imagen, tomada con la cámara del Sondeo de la Energía Oscura, muestra la galaxia NGC1703 en primer plano, rodeada por varios cúmulos de galaxias (*tonos anaranjados*). Estas estructuras no habrían podido formarse sin la presencia de materia oscura.

Los primeros resultados del Sondeo de la Energía Oscura ofrecen una imagen del cosmos que, por primera vez, rivaliza en precisión con la obtenida a partir del fondo cósmico de microondas

Eusebio Sánchez, Ramon Miquel y Juan García-Bellido

Eusebio Sánchez pertenece a la División de Astropartículas del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), en Madrid, y forma parte del Sondeo de la Energía Oscura (DES).

Ramon Miquel es director del Instituto de Física de Altas Energías (IFAE) de Barcelona y miembro de la colaboración DES.

Juan García-Bellido investiga en el Instituto de Física Teórica (IFT), un centro mixto del CSIC y la Universidad Autónoma de Madrid, y forma parte de la colaboración DES.





EL DESCUBRIMIENTO, HACE APROXIMADAMENTE VEINTE AÑOS, DE QUE EL universo actual se expande a una velocidad cada vez mayor cambió por completo nuestra imagen del cosmos. Aquel hallazgo implicaba que cerca del 70 por ciento de su contenido energético total se debía a un tipo de energía hasta entonces desconocida: la energía oscura. Esta contribución es de una naturaleza cualitativamente nueva, puesto que se caracteriza por ejercer una presión negativa y, como consecuencia, acelera la expansión cósmica en lugar de frenarla.

Por otro lado, sabemos también que en torno al 25 por ciento de toda la masa y energía del universo corresponde a una forma de materia también misteriosa, la materia oscura. Aunque jamás se ha observado en los laboratorios, su existencia resulta evidente por la atracción gravitatoria que ejerce sobre las estructuras visibles del cosmos, como las galaxias y los cúmulos de galaxias. En otras palabras: solo el 5 por ciento del universo se compone de materia ordinaria, aquella de la que estamos hechos tanto nosotros como todos los cuerpos celestes que conocemos. El resto es desconocido.

Ante tan impactante conclusión, varios proyectos de observación cosmológica están intentando desentrañar la naturaleza de las enigmáticas componentes oscuras del universo. Uno de ellos es el Sondeo de la Energía Oscura (DES, por sus siglas en inglés), una gran colaboración internacional concebida para cartografiar con un detalle sin precedentes la estructura del universo a gran escala. Sus primeros resultados han sido publicados hace poco y auguran el inicio de una nueva era en cosmología. Por un lado, han permitido medir la composición del sector oscuro con una precisión que, por primera vez, rivaliza con la obtenida a partir del fondo cósmico de microondas, el brillo residual de la gran explosión. Por otro, el buen acuerdo entre ambas técnicas, independientes y muy distintas entre sí, supone un fuerte espaldarazo para el modelo cosmológico estándar, aunque no cabe descartar la aparición de sorpresas durante los próximos años.

MAPA DE GALAXIAS

Hasta hoy, los resultados más precisos sobre la estructura a gran escala del universo se habían obtenido gracias al satélite Planck, de la Agencia Espacial Europea. Este instrumento fue lanzado al espacio en 2009 para estudiar con exquisito detalle las propiedades del fondo cósmico de microondas (CMB, por sus siglas en inglés). Esta luz fue emitida cuando se formaron los primeros átomos neutros, en una época en la que el cosmos apenas contaba 380.000 años (un 0,003 por ciento de su edad actual, la cual se estima en unos 13.800 millones de años), por lo que su análisis equivale a estudiar el universo tal y como era en sus orígenes. A partir de estos datos, y extrapolándolos hasta el presente, la colaboración Planck publicó en 2015 los resultados más precisos jamás obtenidos sobre la composición del cosmos actual.

El proyecto DES comenzó a tomar datos en 2013. Su objetivo es muy distinto, puesto que lo que se propone es obtener un mapa detallado de millones de galaxias. En concreto, DES cartografiará

EN SÍNTESIS

Uno de los mayores retos a los que se enfrenta la cosmología moderna es descifrar la naturaleza de la materia y la energía oscuras. Ambas dan cuenta del 95 por ciento del contenido total de materia y energía del cosmos.

Hasta ahora, los datos más precisos sobre los componentes oscuros del universo se habían obtenido a partir del estudio del fondo cósmico de microondas, la radiación que fue emitida poco después de la gran explosión.

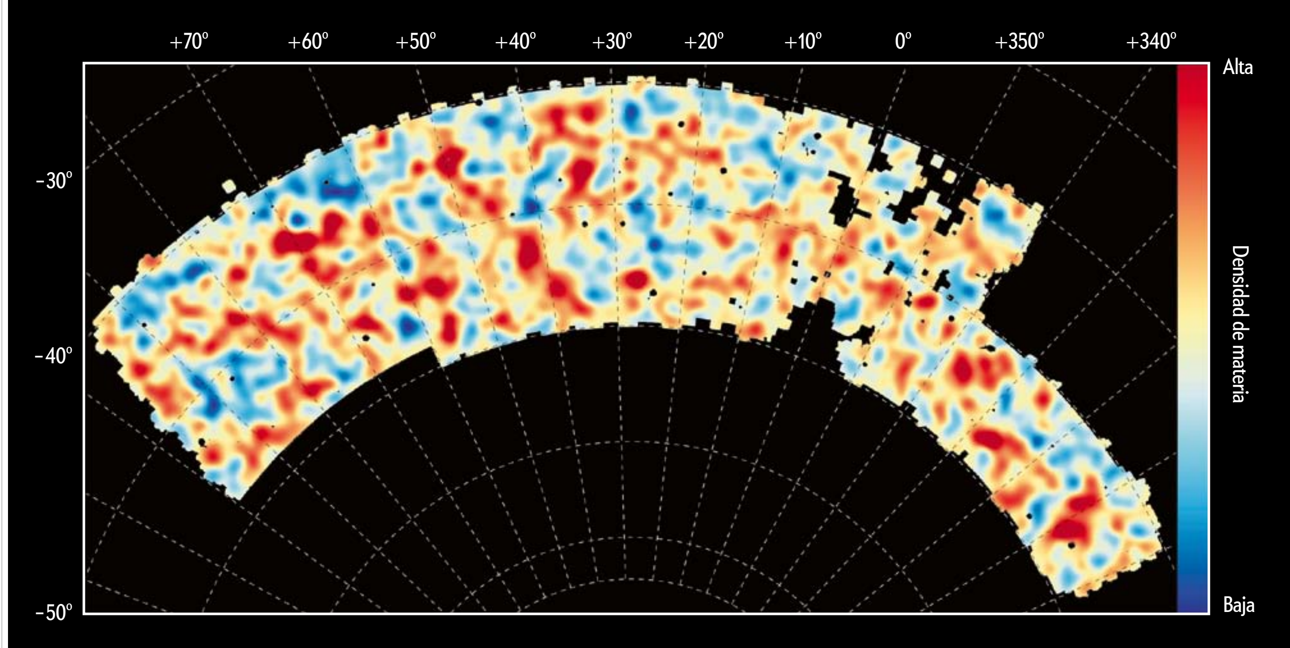
Un gran proyecto internacional, el Sondeo de la Energía Oscura (DES), ha obtenido resultados de una precisión similar a partir de un método completamente distinto: la confección de un gran mapa de millones de galaxias.

La comparación entre ambas técnicas supone un exigente test para la teoría que describe la evolución del universo desde sus orígenes hasta hoy. Por el momento el acuerdo es notable, si bien subsisten pequeñas diferencias.

PÁGINAS ANTERIORES: COLABORACIÓN DES

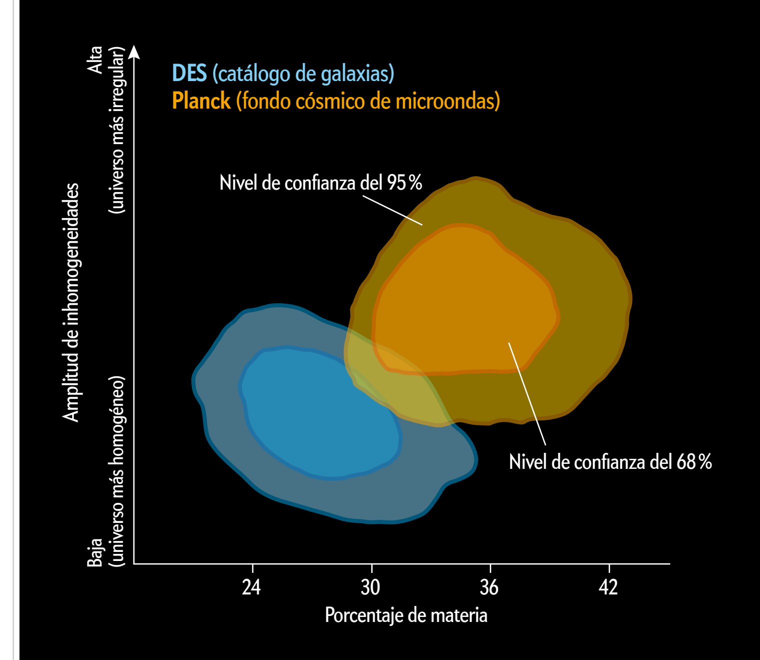
Un nuevo mapa del universo

A partir del cartografiado de 26 millones de galaxias, el Sondeo de la Energía Oscura (DES) ha obtenido uno de los mapas más amplios y precisos de la distribución cósmica de materia, tanto visible como oscura (*arriba*). Ello ha posibilitado medir varios parámetros cosmológicos (*abajo*) y compararlos con los datos obtenidos a partir de los estudios del fondo cósmico de microondas (CMB), la radiación emitida poco después de la gran explosión. El resultado supone uno de los tests más exigentes realizados hasta la fecha de la teoría actual empleada por los cosmólogos para describir la evolución del universo.



DISTRIBUCIÓN DE MATERIA

Esta figura muestra la densidad cósmica de materia, tanto visible como oscura, inferida a partir del primer gran catálogo de galaxias obtenido por el experimento DES . Las zonas rojas indican una densidad mayor que la media; las azules representan regiones más vacías. El mapa cubre unos 1500 grados cuadrados (unas 7000 veces el tamaño de la luna llena) del hemisferio sur y se extiende hasta galaxias cuya luz fue emitida hace unos 9000 millones de años.



NÚMEROS CÓSMICOS

La gráfica indica los valores de la proporción de materia (la fracción del universo que no es energía oscura) y la amplitud de las inhomogeneidades (una medida de cuán agrupada se encuentra la materia en comparación con un universo uniforme) calculados a partir de dos técnicas muy distintas: el análisis del fondo cósmico de microondas efectuado en 2015 por el satélite Planck (*verde*) y el estudio del catálogo de galaxias realizado en el experimento DES (*azul*). Ambos resultados son compatibles dentro de sus respectivos márgenes de error, si bien se observan pequeñas discrepancias. El verdadero significado de tales desviaciones solo podrá descifrarse con más datos.

COLABORACIÓN DES (*mapa de la distribución de materia y gráfica de parámetros cosmológicos*)

un octavo del cielo con una profundidad sin precedentes para un área tan grande, lo que lo convierte en una de las mayores prospecciones del firmamento jamás realizada.

Las observaciones se efectúan desde el telescopio Víctor M. Blanco, en el Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, en Chile. Montada en el foco primario de este telescopio se encuentra la Cámara de la Energía Oscura (DECam), construida por la colaboración DES. Se trata de un instrumento de 570 megapíxeles especialmente diseñado para estudiar las características de la energía oscura y que, junto al telescopio, cuyo espejo principal tiene un diámetro de 4 metros, constituye uno de los sistemas de observación astronómica más potentes que existen en la actualidad, capaz de fotografiar millones de objetos celestes cada noche. La colaboración DES está integrada por casi 400 científicos de siete países y cuenta con una importante participación española a través de cuatro instituciones: el CIEMAT, en Madrid; el Instituto de Ciencias del Espacio, en Barcelona; el Instituto de Física de Altas Energías, también en Barcelona, y la Universidad Autónoma de Madrid.

El catálogo de galaxias se obtiene a partir de múltiples imágenes en zonas contiguas del cielo con filtros de diferentes colores. En cada toma se identifican los objetos celestes y se seleccionan las galaxias, de las que se mide su posición en el cielo y su forma, entre otras características. La observación en distintos colores permite estimar la distancia a la que se encuentran, ya que, cuanto más lejana se halla una galaxia, más rojiza se ve debido a la expansión cósmica. A partir de este catálogo, DES se ha basado en dos fenómenos para obtener sus primeros resultados: la distribución espacial de galaxias y el efecto de lente gravitacional.

El agrupamiento espacial de las galaxias se determina comparando la cantidad de pares de galaxias separadas por un cierto ángulo con la que esperaríamos encontrar si su distribución fuese puramente uniforme. Este tipo de medición constituye un importante test de nuestra comprensión de las fluctuaciones iniciales (las pequeñas inhomogeneidades en la distribución de materia en el cosmos primitivo, las cuales se ven reflejadas en el CMB) y de la evolución cósmica, ya que esta se debe a la acción de la fuerza de la gravedad sobre la materia, desde el inicio del universo hasta hoy.

Por otra parte, el efecto de lente gravitacional constituye una consecuencia de la teoría de la relatividad general, la cual describe la gravedad como la curvatura del espaciotiempo producida por la materia y la energía. La luz emitida por una galaxia lejana se desvía de su trayectoria recta al pasar cerca de otras acumulaciones de materia o energía, lo que deforma su imagen. Este efecto es acumulativo: cuanta más masa se sitúa en el camino tomado por la luz, mayor será la deformación observada. Tales distorsiones son minúsculas, pero la enorme sensibilidad de la DECam permite cuantificarlas con precisión. La intensidad del efecto permite inferir cuánta materia —tanto ordinaria como oscura— hay interpuesta entre las galaxias y la Tierra. Gracias a ello, hemos podido confeccionar el mayor mapa hasta la fecha de la distribución de materia en el universo.



Descubre *Universo oscuro*, uno de los últimos números de nuestra colección de monográficos TEMAS, donde podrás encontrar una panorámica clara y rigurosa sobre el estado actual de la investigación sobre materia y energía oscuras.

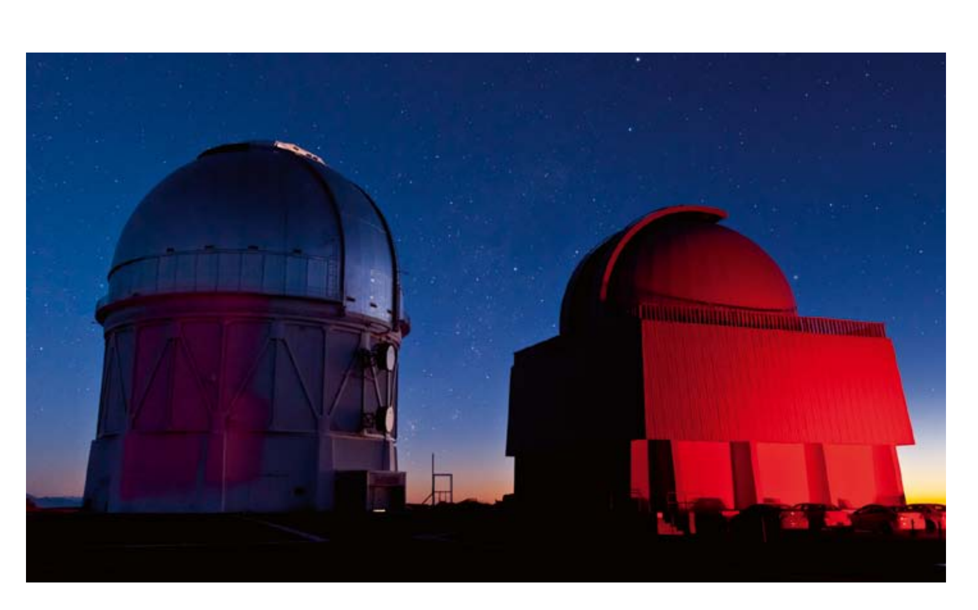


www.investigacionyciencia.es/revistas/temas/numero/84

DEL COSMOS PRIMITIVO AL ACTUAL

En sus etapas iniciales, el universo era un plasma caliente moteado por minúsculas inhomogeneidades en la densidad de materia y energía. Desde entonces hasta hoy, esas pequeñas fluctuaciones iniciales han evolucionado hasta convertirse en las galaxias y los cúmulos de galaxias que vemos en la actualidad. Dicho proceso se ha visto sometido a dos efectos contrapuestos: el de la materia (sobre todo, oscura), la cual tiende a formar aglomeraciones cada vez mayores debido al carácter atractivo de la gravedad; y el de la energía oscura, la cual tiende a «desgarrar» tales estructuras como consecuencia de la aceleración que imprime sobre la expansión cósmica.

Por tanto, el aspecto actual del universo, con sus enormes cúmulos de galaxias y sus grandes vacíos cósmicos, porta la huella de los componentes oscuros. Si logramos medir con precisión cuán agrupadas están hoy las galaxias y la materia, podemos comparar esas observaciones con lo que la teoría nos dice que deberíamos ver si partimos de las pequeñas inhomogeneidades que nos muestra el CMB, las cuales se refieren al universo primitivo. Eso es justamente lo que ha hecho DES. El análisis permite poner a



EL OBSERVATORIO DE CERRO TOLOLO (*imagen*), en Chile, acoge la cámara de 570 megapíxeles del proyecto DES. En los próximos años, la colaboración publicará los resultados de al menos otras cuatro campañas de tomas de datos.

REIDAR HAHN/FERMILAB

prueba nuestras teorías sobre la evolución cósmica y el papel que han desempeñado en ella las componentes oscuras.

A partir de un catálogo de 26 millones de galaxias cartografiadas en un área de unos 1500 grados cuadrados del hemisferio sur, DES ha obtenido valores precisos para la fracción de materia en el cosmos y para la amplitud de las inhomogeneidades (una medida de cuánto se desvía la distribución observada de materia con respecto a la que exhibiría un universo uniforme). Según estos resultados, la materia visible y oscura darían cuenta del 26 por ciento del contenido total del cosmos; el resto, un 74 por ciento, correspondería por tanto a la energía oscura. Estas cifras constituyen los resultados cosmológicos más precisos que se hayan obtenido nunca a partir de un cartografiado de galaxias y, dentro de los márgenes de error, concuerdan con la existencia, proporción y propiedades del universo oscuro tal y como se deducen a partir de los mapas del CMB del satélite Planck.

La comparación entre las observaciones de DES y las de Planck supone un riguroso test para el modelo cosmológico estándar, que lo supera con buena nota. Sin embargo, también se han observado pequeñas discrepancias. Por ejemplo, la amplitud de las inhomogeneidades de materia observada por DES es un 7 por ciento menor que la obtenida por Planck. Ello apunta en la misma dirección que otros resultados previos logrados gracias al efecto lente gravitacional, en los que ya se intuía una posible divergencia. Con la precisión alcanzada hasta ahora tales diferencias no son significativas; sin embargo, si la discrepancia llegara a confirmarse, podría conducir al descubrimiento de nuevas propiedades del sector oscuro del universo.

DES es un proyecto de una enorme riqueza científica. Los resultados que hemos obtenido hasta ahora corresponden a tan solo dos de los varios observables posibles y se deben a la primera campaña de análisis de datos, de las al menos cinco que el experimento acumulará hasta su conclusión. En un futuro cercano veremos enriquecerse estos resultados sustancialmente, tanto mediante la medición de nuevos fenómenos como a través de la ampliación de la muestra de galaxias. Estas mejoras permitirán ir más allá en los tests de la teoría actual del universo. Nos facultarán para investigar la naturaleza de la energía oscura, así como para efectuar pruebas muy exigentes de la teoría de la relatividad general, lo que quizá depare futuras sorpresas. DES ha comenzado una nueva era en la cosmología, y lo mejor está aún por llegar.

PARA SABER MÁS

Dark Energy Survey year 1 results: Cosmological constraints from galaxy clustering and weak lensing. Colaboración DES; disponible en **arxiv.org/abs/1708.01530**, 4 de agosto de 2017.

Dark Energy Survey year 1 results: Curved-sky weak lensing mass map. Colaboración DES, disponible en **arxiv.org/abs/1708.01535**, 4 de agosto de 2017.

Página web del Sondeo de la Energía Oscura (DES): **www.darkenergysurvey.org**

EN NUESTRO ARCHIVO

La mano invisible del universo. Christopher J. Conselice en *IyC*, abril de 2007.

El Sondeo de la Energía Oscura. Joshua Frieman en *IyC*, enero de 2016.

El rompecabezas de la energía oscura. Adam G. Riess y Mario Livio en *IyC*, mayo de 2016.

EVO

BIOLOGÍA

LUCIÓN EN LAS FRONTERAS DE LA VIDA

El estudio de los peces que habitan en los manantiales de aguas sulfurosas revela mecanismos de la selección natural

Rüdiger Riesch y Martin Plath

Rüdiger Riesch es profesor de biología evolutiva en el Royal Holloway, en la Universidad de Londres. Sus investigaciones versan en los mecanismos que crean, mantienen y limitan la biodiversidad.

Martin Plath es catedrático de zoología básica y aplicada en la Universidad A&F del Noroeste, en Yangling, China. Estudia el comportamiento y su evolución, así como la adaptación local y la especiación.

Una tarde de septiembre en Tabasco, al sur de México, caminábamos por la selva guiados por el rumor del agua, en busca de un pez tan chico como notable. Las mariposas morfo azules revoloteaban haciendo gala de su brillo iridiscente y los monos aulladores bramaban desde las copas, distracciones que hacían más soportables el calor y la humedad sofocantes. Al poco divisamos un martín pescador verde que se zambullía en un riachuelo cercano y regresaba a su posadero para devorar la captura. Había apresado el pez que buscábamos: un topote del Atlántico (*Poecilia mexicana*), perteneciente a la familia de los pecílidos (Poeciliidae), cuyas hembras paren crías ya formadas y cuyos machos lucen llamativos colores que los convierten en piezas apreciadas por los acuaristas de todo el mundo.

Durante un instante recordamos con añoranza nuestro trabajo de campo en los días anteriores, cuando estudiamos el topote en un enclave a pocos kilómetros de allí, llamado arroyo de Cristal por la limpidez de sus aguas. Nuestra labor en aquel lugar había sido idílica: pudimos solazarnos sobre grandes rocas y troncos y sumergir las piernas en el agua fresca, mientras el objeto de nuestro interés nadaba entre los pies.

Todo iba a ser distinto aquella jornada. Mucho antes de llegar a nuestro destino, el olor a huevos podridos ya colmaba el aire, y las aguas, que corrían calmas, no eran cristalinas en absoluto, sino turbias y lechosas a consecuencia de la alta concentración de partículas de azufre en suspensión. Desde la orilla pudimos ver que las rocas sumergidas estaban cubiertas de un tapiz viscoso de bacterias sulfurosas, y el nutrido número de peces que nadaba en aquel arroyo hediondo lo hacía a flor de agua, con la boca abierta de par en par como si aspiraran bocanadas de aire.

A un recién llegado le habría costado creer que estábamos ante la misma especie que observamos la víspera en el arroyo de Cristal. Al fin y al cabo, el hábitat era radicalmente distinto y sus cabezas eran mucho más voluminosas, aparte de mostrar esa peculiar actitud para respirar. Pero no había duda sobre este extremo. Al fin habíamos llegado al lugar donde trabajaríamos ese día: El Azufre, un pequeño arroyo con niveles tóxicos de sulfuro de hidrógeno (H_2S) de origen natural donde viven los topotes, que se las han apañado para tolerar semejantes condiciones.

Los ambientes ricos en H_2S son mortales para los seres vivos inadaptados, incluidos los humanos; es cuestión de minutos o segundos. A la vista de su toxicidad, no sorprende que los organismos que medran en esas aguas hayan fascinado a los científicos desde hace tiempo. Los pecílidos adaptados a los entornos sulfurosos son objeto de interés desde los años sesenta del siglo pasado. Pero en la última quincena se ha generado un aluvión de estudios acerca de la ecología y la evolución de estos peces, en buena medida gracias a los avances en las técnicas de secuenciación genómica, que han posibilitado ver, a escala molecular, la adaptación a las condiciones ambientales adversas. Aunando las observaciones de campo con los análisis del ADN hemos adquirido asombrosos detalles sobre los entresijos de la selección natural, un mecanismo fundamental de la evolución. Además, estas investigaciones nos están permitiendo explorar los límites de la adaptación en los peces. Provistos de esa información, tal vez algún día logremos pronosticar el destino de las especies que soportan la contaminación y otras alteraciones del medio natural motivadas por la actividad humana.

HÁBITATS INHÓSPITOS

Los pecílidos no son los únicos seres vivos adaptados a tales condiciones. Nuestro planeta alberga muy diversos ambientes extremos, desde hirvientes fuentes termales y profundidades abisales sometidas a presiones aplastantes hasta desiertos salinos y

EN SÍNTESIS

Varias especies de peces pertenecientes a la familia de los pecílidos han logrado colonizar riachuelos y ríos cuyas aguas albergan concentraciones tóxicas de sulfuro de hidrógeno.

Todos comparten rasgos comunes, como una cabeza de gran tamaño y unas crías voluminosas, los cuales facilitan la supervivencia en ese entorno infernal.

Los análisis de su ADN indican que han adquirido esas adaptaciones similares a través de vías moleculares dispares.

El ambiente extremo parece haber acelerado el proceso de especiación.

PÁGINAS ANTERIORES: MARK ROSS

cuevas sumidas en la oscuridad perpetua, y todos ellos acogen formas de vida. Así y todo, las aguas sulfurosas destacan por ser especialmente hostiles para la vida. El sulfuro de hidrógeno es un gas venenoso que se abre paso de modo natural hasta alcanzar los manantiales de agua dulce, las fumarolas hidrotermales del lecho oceánico o los esteros costeros y las marismas. Emana de las profundidades de la Tierra a consecuencia de la actividad geológica, como ocurre en los arroyos sulfurosos que estudiamos, o de la descomposición de grandes acumulaciones de materia orgánica. También puede envenenar los ambientes acuáticos como contaminante generado por las actividades humanas, entre ellas la fabricación de papel, el curtido de pieles y la producción de gas natural y electricidad geotérmica. Hasta las concentraciones ínfimas de H_2S son sumamente tóxicas para la mayoría de los animales, puesto que la molécula secuestra el oxígeno disperso en el ambiente y los priva de este gas vital; además, bloquea la actividad de la hemoglobina, la proteína encargada de transportar el oxígeno en la sangre. Toda esta actividad acaba provocando la muerte por asfixia. El H_2S también altera el proceso a través del cual las células extraen energía de los nutrientes. Estos peligros se ven agravados por el hecho de que atraviesa sin trabas las membranas de las células en el delicado tejido de las agallas, por lo que no es preciso que el pez lo ingiera para sufrir sus efectos nocivos. Los humanos tampoco somos inmunes al gas, de modo que intentamos reducir todo lo posible la exposición al H_2S o usamos equipos de protección cuando trabajamos en las cercanías de ambientes sulfurosos durante períodos dilatados. No sorprende, pues, que las emanaciones naturales y antropogénicas de H_2S que van a parar a los entornos acuáticos causen en todo el mundo grandes mortandades de peces y otros organismos.

Varias especies de peces teleósteos, el grupo hoy predominante en los mares y en las aguas continentales del que forman parte los pecílidos, se han adaptado al H_2S ambiental. Algunas de las más enigmáticas, como varios pleuronectiformes (peces planos) y sinuosos zoárcidos (viruelas), viven en torno a las surgencias de aguas termales y frías del lecho marino. Llegar hasta ellos es arduo y caro, pues exige el despliegue de batiscafos, hecho que impide llevar a cabo la mayoría del trabajo experimental que nos interesa. Por eso nuestra investigación se ha centrado en los accesibles pecílidos; en concreto, en más de una decena de especies de topotes, gupis, colas de espada y peces mosquito que han colonizado docenas de manantiales sulfurosos en arroyos y riachuelos del Nuevo Mundo.

MECANISMOS ADAPTATIVOS

Los pecílidos sulfotolerantes han desarrollado una gama de caracteres que les permiten prosperar en ambientes tóxicos. Algunos son conductuales. Así, ante la escasez de oxígeno propia de las aguas sulfurosas, pasan gran parte del tiempo cerca de la superficie, donde pueden aprovechar la capa superior de la columna de agua, más rica en oxígeno. (Los peces que practican la respiración superficial, aunque parece que traguen aire, no lo hacen. En realidad, engullen agua rica en oxígeno.) Este comportamiento tiene un precio, pues limita el tiempo disponible para otras actividades, como la búsqueda de alimento, pero les permite conseguir el vital oxígeno.

La deficiencia de oxígeno en esas aguas también ha modelado la anatomía de los peces. Un rasgo que salta a la vista es la cabeza, notablemente más voluminosa que las de sus congéneres que nadan en las aguas inocuas. Ese agrandamiento se explica por el crecimiento de las agallas, que incrementa la

HALLAZGOS

Iguales y distintos a la vez

Varios miembros de la familia de los pecílidos moran en manantiales sulfurosos de arroyos y ríos del Nuevo Mundo. Dotados de diversos rasgos comunes que les permiten tolerar las hostiles condiciones, como cabezas y bocas desproporcionadamente grandes, el análisis de su ADN indica que son descendientes de los mismos peces que hoy habitan en las aguas límpidas cercanas. Todo apunta a que tales especies adquirieron esa tolerancia al azufre por separado, a través de mutaciones genéticas distintas.

FUENTE: «PARALLEL EVOLUTION OF COX GENES IN H_2S-TOLERANT FISH AS KEY ADAPTATION TO A TOXIC ENVIRONMENT». MARKUS PFENNINGER ET AL. EN *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 5, ART. 3873. PUBLICADO EN LÍNEA EL 12 DE MAYO DE 2014; MAPPING SPECIALISTS (*mapa*), JILLIAN WALTERS (*ilustraciones*)

captación de oxígeno. El topote de Teapa (*Poecilia sulphuraria*), una especie endémica de un puñado de manantiales sulfurosos dispersos por los estados mexicanos de Tabasco y Chiapas, ha desarrollado asimismo unos peculiares apéndices en el labio inferior que facilitan la absorción del gas. Protuberancias parecidas se encuentran en otros peces no pecílidos propios de otros ambientes hipóxicos del planeta, por lo que se cree que, al ampliar la superficie de la región bucal, facilitan el barrido de la capa más superficial del agua en busca del oxígeno.

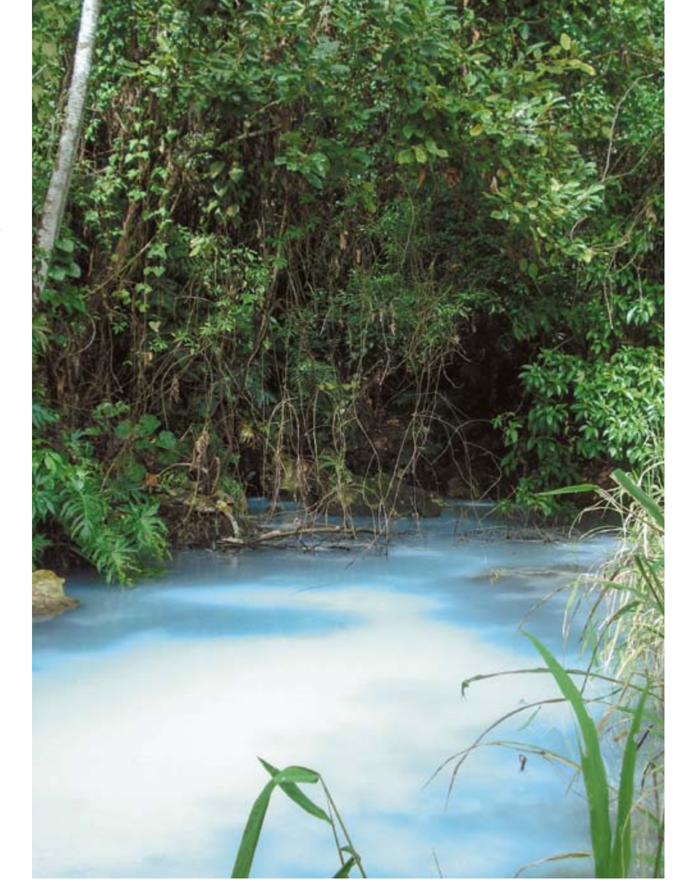
Además de adquirir los rasgos que mejoran la captación de oxígeno, los habitantes de los manantiales sulfurosos han concebido adaptaciones que contribuyen a neutralizar los efectos tóxicos del H_2S. Todos sintetizan la enzima sulfuro:quinona oxidorreductasa (SQR), con la que neutralizan concentraciones muy bajas del gas venenoso al transformarlo en compuestos inocuos. Pero cuando las concentraciones son elevadas, como ocurre en los manantiales, la enzima queda saturada y el exceso comienza a alterar la producción de energía en las células. Nuestros peces han desarrollado modificaciones en la ruta de la SQR que mantienen su actividad desintoxicante aún con valores altos de H_2S.

Los pecílidos sulfotolerantes también engendran alevines mucho más grandes que sus congéneres de las aguas normales. Si bien esa talla implica que produzcan menos descendencia, la estrategia tiene sentido dadas las condiciones ambientales. El aumento de la talla se traduce en un mayor incremento del volumen con respecto al que experimenta la superficie corporal. Así, pues, los descendientes presentan una mayor relación entre el volumen y la superficie de su cuerpo. Ello supone una ventaja, pues disponen de más tejido para metabolizar el H_2S y, al mismo tiempo, menos superficie para permitir la entrada del gas.

Quizás el hecho más sorprendente acerca de los pecílidos sulfotolerantes es que comparten numerosas adaptaciones. Hemos constatado que los pertenecientes a distintas especies y regiones geográficas han desarrollado idénticos caracteres novedosos con respecto a sus ancestros que nadan en las aguas cercanas exentas de sulfuro.

La estrecha semejanza entre los diversos linajes de peces sulfotolerantes suscita una pregunta intrigante: ¿las poblaciones que han adquirido de forma repetida e independiente los rasgos adaptativos de la tolerancia han experimentado los mismos cambios en su ADN, o han desarrollado esos rasgos a través de vías moleculares distintas? Junto con Markus Pfenninger, del Centro de Investigación de la Biodiversidad y del Clima de Fráncfort del Meno, y otros colaboradores, nos propusimos averiguarlo. Analizamos el ADN de varios cientos de topotes atlánticos procedentes de dos pares de poblaciones, una integrada por individuos adaptados a las aguas sulfurosas y la otra por sus ancestros inadaptados, que habían sido capturados en dos cuencas fluviales paralelas del sur de México. (La misma cuenca fluvial puede contener afluentes sulfurosos y normales.) La estadística nos permitió deducir cuántas variantes existen de un gen en todo el genoma. Y también determinar qué variantes muestran signos de presentar una elevada frecuencia en esas poblaciones por obra de la selección natural (al facilitar la supervivencia y la reproducción) frente a las que son abundantes por mero azar.

Comprobamos así que los cambios genómicos hallados en una de esas poblaciones adaptadas a las aguas sulfurosas solían ser exclusivos y no estaban presentes en la otra. Acto seguido, introdujimos los genes dispares de ambas en una base de datos que contiene las funciones y las interacciones de varios genes. Resultó que, a pesar de que los genes que habían sido alterados diferían de una población a otra, la mayoría de ellos intervenían en la regulación de las mismas rutas metabólicas, las cadenas de reacciones químicas que hacen posible la vida. (En este sentido, el metabolismo no solo concierne al modo en que los peces consumen la energía que obtienen de los alimentos, sino también a las funciones que las diversas proteínas desempeñan en la maquinaria bioquímica que los mantiene vivos, que pueden formar parte de todo tipo de adaptaciones.) Nuestros datos dejan entrever que son muchas las rutas genéticas que conducen a adaptaciones similares frente a un factor de estrés ambiental.



EL AZUFRE, un arroyo de aguas venenosas del sureste de México, luce este aspecto lechoso por las abundantes partículas de azufre en suspensión.

CORTESÍA DE MATTHIAS SCHULTE

Un estudio reciente de Joanna Kelley, de la Universidad Estatal de Washington, Michael Tobler, de la Universidad Estatal de Kansas, y sus colaboradores parece corroborar esa idea. Han descubierto que los patrones de expresión génica (el uso de los genes para fabricar proteínas y otras moléculas) difieren entre las diversas poblaciones de topotes atlánticos sulfotolerantes del sur de México. En cambio, la expresión de los genes que intervienen en la regulación de las rutas metabólicas muestra el mismo grado elevado en todas. Ese patrón de actividad génica constituye un reflejo de lo que vemos en las secuencias mismas de los genes: el pez ha seguido diferentes sendas moleculares para llegar a las mismas soluciones frente al problema de vivir en las aguas tóxicas.

El estudio de los pecílidos sulfotolerantes también suscita otra incógnita fundamental de la biología evolutiva. Si bien algunos especialistas argumentan que las poblaciones expuestas a los mismos factores de estrés acaban experimentando cambios evolutivos bastante parecidos, otros sostienen que el orden exacto de la evolución puede condicionar el resultado final. El razonamiento que se esconde tras esta última idea es que si ciertas mutaciones surgidas al azar aportan adaptaciones esenciales, se propagarán con rapidez en esa población sulfotolerante. La concurrencia de diferentes adaptaciones esenciales influiría en la ulterior trayecto-

ria evolutiva seguida por la población al alterar la ventaja selectiva que otorgan las mutaciones surgidas en momentos posteriores. Nuestros resultados sustentan esa idea. Estudiamos tres poblaciones sulfotolerantes de topote atlántico y descubrimos que, en dos, la resistencia al azufre había surgido en un gen que sintetiza una proteína clave denominada citocromo c-oxidasa (COX), implicada en la generación de la principal fuente de energía de la célula. La tercera población no adquirió esa adaptación esencial y tuvo que idear otra solución evolutiva para proteger del gas tóxico sus procesos generadores de energía.

HERVIDEROS DE LA EVOLUCIÓN

Los desafíos que entraña la colonización de ese ambiente infernal son tan formidables que cabe preguntarse por qué la selección natural terrestre ha osado apostar por esa empresa. La respuesta es que hay una ventaja inestimable: la práctica ausencia de otros peces, tanto depredadores como competidores por el alimento. En los arroyos sulfurosos del sur de México uno solo encuentra pecílidos especializados, ni rastro de las numerosas especies de peces que pululan en las aguas cercanas.

De hecho, lejos de sofocar la evolución de nuevas formas de vida, la naturaleza inhóspita de esas aguas la alentaría. Según el concepto clásico de especiación, la separación prolongada, por la acción de barreras geográficas, de poblaciones antes conexas hará que sigan sus propias sendas evolutivas hasta que difieran tanto entre sí que puedan ser calificadas como especies distintas. Pero los biólogos están acumulando cada vez más pruebas de que la adaptación a condiciones ecológicas divergentes puede fomentar la especiación sin la presencia de tales barreras. La observación de los pecílidos adaptados a las aguas sulfurosas refuerza esta suposición.

Hemos descubierto que la adaptación a un tipo de hábitat, sea sulfuroso o no, limita las posibilidades de los peces para moverse libremente por otro tipo de ambiente. Esta forma de selección natural hace que los peces sulfotolerantes aparezcan solo en las surgencias sulfurosas, y viceversa, aun cuando ambos hábitats están separados por escasas decenas o centenas de metros.

A la hora de crear y mantener el aislamiento reproductor en tales sistemas, intervienen otros factores importantes, como la depredación (los inadaptados son presas más propicias para los depredadores). Puede que se dé la migración entre los hábitats, o que los miembros de las diversas poblaciones, o ecotipos, se encuentren en la confluencia de las aguas sulfurosas con las normales, pero los peces no se cruzan. Los experimentos de elección de pareja han revelado que las hembras de las aguas no sulfurosas prefieren aparearse con machos de su ecotipo. Que exhiban esa preferencia (y el grado en que lo hacen) parece depender de la intensidad de la selección natural: hemos observado que esa inclinación hacia su mismo ecotipo resulta más fuerte cuando la selección natural contra los machos sulfotolerantes migrantes es débil. Al parecer, cuando las hembras tienen más posibilidades de hallar machos foráneos —y, por tanto, de engendrar descendencia híbrida inadaptada— adquieren una aversión más fuerte hacia ellos. En cambio, cuando la selección natural contra los migrantes es fuerte y la probabilidad de coincidir con ellos es baja, resulta improbable que las hembras desarrollen esa aversión hacia los machos extraños.

El número exacto de pecílidos que han devenido en nuevas especies en su proceso de adaptación a los manantiales sulfurosos es incierto porque, en muchos casos, no sabemos lo lejos que ha llegado la diferenciación genética o si sigue habiendo cruzamiento con las poblaciones vecinas. Pero algunos de los linajes sulfotolerantes que poseen todas esas adaptaciones tienen unos 100.000 años de antigüedad, bastante jóvenes en términos evolutivos. Que hayan adquirido sus características peculiares y logrado cierto grado de aislamiento reproductor respecto de sus vecinos de las aguas inocuas en un lapso relativamente breve da a entender que las condiciones extremas impuestas por las aguas sulfurosas podrían espolear la especiación. Un estudio nuestro avala esta idea. Hemos constatado que el grado de aislamiento reproductor entre los pecílidos sulfotolerantes aparece vinculado directamente con la concentración de H_2S en cada ecosistema.

Si los pecílidos han sido capaces de adquirir en poco tiempo adaptaciones a un veneno natural, ¿están preparados para afrontar también la contaminación derivada de la actividad humana? Un estudio publicado en 2016 en *Science* de la mano de Noah Reid, ahora en la Universidad de Connecticut, y sus colaboradores constata que el fúndulo (*Fundulus heteroclitus*, miembro de una familia afín a los pecílidos) de Norteamérica ha logrado una rápida adaptación evolutiva a la contaminación que emana de los complejos industriales. Los autores plantean que podría ser el resultado de la enorme diversidad genética del fúndulo, que lo dotaría de numerosas herramientas genéticas entre las que escoger para adaptarse a las nuevas presiones selectivas impuestas por la contaminación. Aún no sabemos con certeza si los pecílidos están provistos de modo similar, aunque nuestras investigaciones apuntan a que las nuevas mutaciones del ADN son más importantes para ellos que la variabilidad genética que pudieran tener. Pero, considerados en conjunto, la investigación del fúndulo y nuestros hallazgos parecen indicar que por lo menos un pequeño grupo de peces menudos y efímeros que engendran varias generaciones cada año podrían, en determinadas condiciones, tolerar algunos de los drásticos cambios ambientales provocados por la actividad humana.

Todavía quedan muchas preguntas en el tintero. Por ejemplo, ignoramos por qué la presencia del H_2S ha propiciado la aparición de adaptaciones predecibles y del aislamiento reproductor en ciertos ecosistemas pero no en otros. Con todo, las técnicas de secuenciación del ADN avanzan con rapidez y los costes no cesan de bajar. A la vista de esa tendencia, si sumamos las últimas publicaciones sobre los genomas de varios pecílidos, pronto podríamos conseguir grandes avances en el conocimiento de los mecanismos genéticos que rigen los patrones comunes y singulares de la evolución en esas aguas mortíferas. IyC

PARA SABER MÁS

Colonisation of toxic environments drives predictable life-history evolution in livebearing fishes (Poeciliidae). Rüdiger Riesch et al. en *Ecology Letters*, vol. 17, n.º 1, págs. 65-71, enero de 2014.

Parallel evolution of COX genes in H_2S-tolerant fish as key adaptation to a toxic environment. Markus Pfenninger et al. en *Nature Communications*, vol. 5, art. 3873. Publicado en línea el 12 de mayo de 2014.

Unique evolutionary trajectories in repeated adaptation to hydrogen sulphide-toxic habitats of a neotropical fish (*Poecilia mexicana*). Markus Pfenninger et al. en *Molecular Ecology*, vol. 24, n.º 21, págs. 5446-5459, noviembre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Peces cavernícolas. Aldemaro Romero en *IyC*, septiembre de 2011.

La vertiginosa evolución de los cíclidos. Axel Meyer en *IyC*, marzo de 2016.

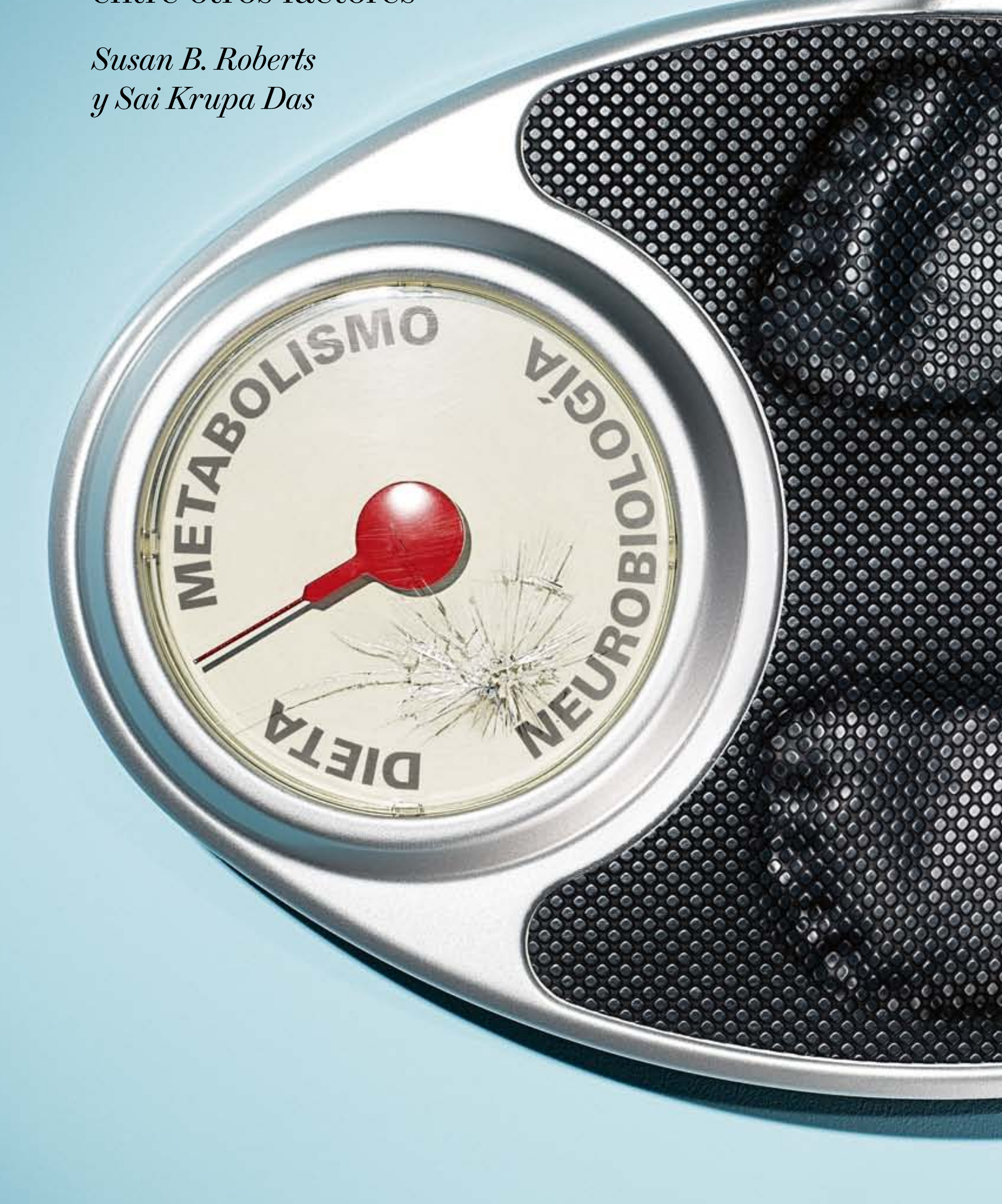
La especiación de la orca común. Rüdiger Riesch en *IyC*, enero de 2017.

LA COMPLEJA FÓRMULA DE LA PÉRDIDA DE PESO

SALUD

Tras dos décadas de investigación, se demuestra que para adelgazar no solo importan las calorías que consumimos. También influyen la composición y el grado de procesamiento de los alimentos, entre otros factores

Susan B. Roberts y Sai Krupa Das





La epidemia global de obesidad es uno de los mayores retos de salud a los que se enfrenta la humanidad. Unos 600 millones de personas, un 13 por ciento de los adultos del mundo, eran obesos en 2014, una cifra que había aumentado más del doble desde 1980. Un 37 por ciento de los adultos estadounidenses son obesos en la actualidad, y un 34 por ciento adicional muestra sobrepeso. De persistir esta tendencia, los expertos en salud estiman que para el 2030 la mitad de la población será obesa en ese país.

Si las dietas, los programas de telerrealidad o la fuerza de voluntad surtieran efecto de verdad, ya se habría producido un punto de inflexión. La obesidad (entendida como un exceso de grasa corporal y definida por un peso igual o superior al 120 por ciento del peso ideal) resulta demasiado compleja para resolverla con apaños rápidos. No es fácil determinar por qué comemos lo que comemos, cómo controla el cuerpo su peso ni cómo lograr que la gente modifique sus hábitos de vida poco saludables. Nuestro laboratorio ha invertido las últimas dos décadas en intentar desarrollar, con el mayor rigor científico posible, métodos más efectivos para combatir la obesidad y mantener un peso saludable.

Una buena parte de nuestro trabajo ha puesto en entredicho dogmas universales y ha abierto las puertas hacia enfoques nuevos. De entrada, hemos demostrado que el ejercicio físico no resulta primordial cuando queremos adelgazar, si bien tiene numerosos beneficios en nuestra salud, entre ellos contribuir a mantener un peso adecuado. Tal como numerosos expertos sospechaban, y tal como nuestro grupo y otros han demostrado, el tipo y la cantidad de los alimentos ingeridos resultan mucho más importantes a la hora de desprendernos de algunos kilos. Nuestras investigaciones han profundizado más en el tema y han revelado que distintas personas adelgazan de forma más efectiva con diferentes alimentos. Ello nos permite crear planes personalizados para perder peso, mucho más eficaces que el uso de programas estándar pensados para todo el mundo.

Creemos que este nuevo enfoque podría mejorar la salud de millones de personas en todo el planeta. La obesidad aumenta el riesgo de las principales enfermedades no transmisibles, como la diabetes de tipo 2, la cardiopatía, el ictus y varios tipos de cáncer, y llega a reducir hasta en 14 años la esperanza de vida de

Susan B. Roberts es investigadora y directora del Laboratorio de Energía y Metabolismo del Centro Jean Mayer de Investigación sobre Nutrición Humana y Envejecimiento, en la Universidad Tufts. En el mismo centro, es profesora de nutrición de la Escuela Friedman de Ciencia y Política Nutricionales, y profesora de psiquiatría y miembro del equipo de pediatría en la Facultad de Medicina.



Sai Krupa Das es investigadora del Laboratorio de Energía y Metabolismo que dirige Roberts y profesora de la Escuela Friedman de Ciencia y Política Nutricional.

una persona. Los estudios demuestran que el exceso de peso también merma la capacidad del organismo para combatir las infecciones, así como para dormir y envejecer bien, entre otros aspectos. Resulta imperativo averiguar el modo de atajar esta epidemia.

USO EFICIENTE DE LAS CALORÍAS

Para adelgazar solo hay que aplicar una sencilla fórmula: quemar más calorías de las que consumimos. Durante décadas, los expertos creían que no era muy importante cómo se lograba ese déficit: mientras se obtuvieran los nutrientes adecuados, se podía perder peso con cualquier combinación de aumento del ejercicio y reducción de la ingesta. Esta premisa se desmorona cuando se intenta trasladar a la vida real, porque no tiene en cuenta ni la fisiología ni la psicología humanas. Así, averiguar esos detalles y proponer un método basado en datos científicos para controlar el peso ha llevado más tiempo y ha requerido un grupo más amplio de expertos de lo que nadie había esperado.

El primer paso, a principios de los años noventa, consistió en resolver una cuestión básica: ¿cuánta energía necesita en promedio el organismo humano para funcionar? Esta sencilla pregunta no tiene fácil respuesta. Las personas obtienen energía de la comida, cierto. Pero, para emplearla como combustible, esa comida debe ser metabolizada o procesada. El oxígeno que respiramos ayuda a quemar ese combustible, y el excedente se almacena en el hígado en forma de glucógeno (un tipo de hidrato de carbono) o de grasa. Cuando el hígado está saturado, el exceso se almacena en adipocitos (células grasas) de otras partes del cuerpo. Además, como consecuencia del metabolismo se generan dióxido de carbono que eliminamos al exhalar y otros productos de desecho que se expulsan a través de la orina y las heces. Este proceso es más o menos eficiente según la persona y, en un mismo sujeto, según las circunstancias.

Durante tiempo, la mejor manera de calcular el consumo energético de una persona consistía en mantenerla dos semanas en un laboratorio especializado como el nuestro, donde los investigadores medían todo lo que el sujeto comía y la evolución de su peso. Otra forma se basaba en encerrar a voluntarios en unas cámaras selladas, denominadas calorímetros, y medir el oxígeno que respiraban y el dióxido de carbono que exhalaban. De este modo, se determinaban los requisitos energéticos básicos del organismo. Como es obvio, ninguno de estos métodos resulta muy práctico ni logra reproducir las condiciones normales del día a día.

El uso de agua con marcaje doble representa una técnica mucho más sencilla. El agua contiene mínimas cantidades de dos isótopos inofensivos, no radiactivos: el deuterio (^{2}H) y el oxígeno 18 (^{18}O). En el intervalo de entre una y dos semanas tras haber bebido esta agua, se excreta en la orina la totalidad del deuterio y parte del oxígeno 18 (el resto de este último se exhala como dióxido de carbono). A partir de muestras de orina, los investigadores comparan a qué velocidad se eliminan los isótopos del cuerpo durante ese tiempo. Con estos datos, calculan la cantidad de calorías que quema un individuo sin interrumpir sus actividades diarias normales.

El método fue desarrollado en los años cincuenta, pero resultaba muy caro para emplear en humanos. Aunque en los ochenta los precios bajaron y la técnica se mejoró, en ocasiones aún tuvimos que pagar hasta 2000 dólares para realizar una única medida. Como consecuencia, tardamos más de veinte años en recopilar suficientes datos y averiguar cuánta energía necesita el organismo para evitar la pérdida o el aumento de peso.

Gracias a esos experimentos, realizados por nosotros y por otros equipos, determinamos que los humanos no necesitamos demasiadas calorías para estar activos y sanos. Cualquier consumo de más deriva en un aumento de peso. En este aspecto somos muy similares a otros primates, como los chimpancés y los orangutanes. Un varón adulto de peso adecuado y estatura media que viva en EE.UU. necesita unas 2500 kilocalorías al día para mantener su peso, mientras que una mujer no obesa precisa solo unas 2000. (Los hombres tienden a consumir más calorías porque en promedio poseen un cuerpo más voluminoso y mayor masa muscular.)

Sin embargo, estudios llevados a cabo con otras especies, como el ciervo rojo (*Cervus elapus*, con un peso medio de 100 kilos en hembras de 6 años, según un experimento) y las focas grises (*Halichoerus grypus*, de 120 kilos, según datos de tres hembras adultas), demostraron que para mantener su tamaño necesitaban hasta dos y tres veces más calorías por kilogramo de peso corporal que los primates.

Resulta tentador suponer que los estadounidenses requieren pocas calorías porque sus vidas son más sedentarias, pero hay pruebas de que incluso las poblaciones indígenas que llevan una vida muy activa precisan cantidades similares. Herman Pontzer, del Colegio Hunter, y sus colaboradores midieron los requisitos energéticos en un grupo de cazadores de la población hadza del norte de Tanzania. Descubrieron que los hombres necesitaban 2649 kilocalorías de media al día. Las mujeres, que, como

EN SÍNTESIS

Durante años, los nutricionistas han creído que todas las calorías son en esencia iguales a la hora de ganar o perder peso, y que la dieta y el ejercicio previenen con igual eficacia la obesidad.

Se han confirmado algunas excepciones importantes a esa regla general, gracias a la información meticulosamente recopilada por los científicos a lo largo de las últimas dos décadas.

La composición de la comida, en proteínas y fibra, resulta ser casi tan importante como la cantidad que se consume. En la práctica, el ejercicio tiene un efecto menor de lo que se había previsto.

Estos nuevos y detallados hallazgos sobre por qué engordamos y cuál es el mejor modo de adelgazar podrían suponer una enorme ayuda en la batalla contra el peso excesivo.

PÁGINAS ANTERIORES: DAN SAELINGER

los hombres, eran más pequeñas que sus homónimas en otras regiones, necesitaban solo 1877. Otro estudio con población indígena yakut en Siberia midió necesidades de 3103 kilocalorías en los hombres y de 2299 en las mujeres. Hombres y mujeres de los aymara, del altiplano andino, requerían, respectivamente, 2653 y 2342 kilocalorías.

Aunque nuestras necesidades energéticas no han cambiado, datos del Gobierno de EE.UU. indican que los habitantes del país consumen hoy en promedio unas 500 kilocalorías más al día (el equivalente de un sándwich de pollo o dos tacos de ternera en un restaurante de comida rápida) que en los años setenta. Un exceso de solo entre 50 y 100 kilocalorías al día (una o dos galletas) puede llevar a una ganancia de peso de entre uno y tres kilos en un año, lo que supone entre 10 y 30 kilos de más al final de una década. ¿Es de extrañar, entonces, que tantos presentemos sobrepeso u obesidad?

CALORÍAS COMPLEJAS

La fórmula para lograr un peso estable (no consumir más calorías de lo que precisa el cuerpo para conservar la temperatura, mantener el funcionamiento básico y realizar actividad física) es solo otra manera de decir que la primera ley de la termodinámica también se cumple en los sistemas biológicos: la cantidad total de energía que se incorpora a un sistema cerrado (en este caso, el cuerpo) es igual a la cantidad total gastada o almacenada. Pero esta ley no indica que el cuerpo deba usar la energía de todos los alimentos con la misma eficiencia. Esto nos lleva a la cuestión fundamental: ¿contribuyen todas las calorías de la misma manera a la ganancia de peso?

Los estudios en este campo todavía están en marcha, y para entender por qué ha llevado tanto tiempo obtener respuestas definitivas tenemos que remontarnos al final del año 1890, a una pequeña comunidad de Storrs, en Connecticut. Fue allí donde el químico Wilbur O. Atwater construyó el primer centro de los EE.UU. para la investigación de la producción y el consumo de comida. De hecho, fue Atwater el primero en demostrar que la primera ley de la termodinámica es aplicable a los humanos y al resto de los animales. (Algunos científicos de su época pensaban que los humanos podríamos hallarnos exentos.)

El diseño experimental de los laboratorios metabólicos ha cambiado muy poco desde los tiempos de Atwater. Para determinar cuánta energía obtiene un cuerpo de los tres componentes fundamentales de los alimentos (proteínas, grasas y carbohidratos), pidió a varios voluntarios varones que vivieran, de uno en uno, en un calorímetro durante varios días. En ese período, Atwater y sus colaboradores midieron todo lo que comía cada probando, además de en qué se convertía esa comida, desde el dióxido de carbono exhalado hasta las cantidades de nitrógeno, carbono y otros componentes expulsados en la orina y las heces. Al final, determinaron que el cuerpo humano puede extraer 4 kilocalorías de cada gramo de proteínas y de carbohidratos y 9 kilocalorías de cada gramo de grasa. Estas cifras se conocen hoy en día como factores de Atwater.

Pero los alimentos no se presentan en forma de proteínas, grasas o carbohidratos puros. El salmón contiene proteínas y grasas; las manzanas, carbohidratos y fibra; la leche, grasas, proteínas, carbohidratos y mucha agua. Resulta que las propiedades físicas y la composición de la comida influyen más en la eficiencia con la que el cuerpo digiere y absorbe esas calorías de lo que se pensaba.

En 2012, David Baer, del Centro de Investigación de Nutrición Humana del Departamento de Agricultura de los EE.UU., en Maryland, demostró que el organismo es incapaz de extraer todas las calorías indicadas en la etiqueta nutricional de algunos frutos secos, en función de cómo están procesados. Las almendras crudas enteras, por ejemplo, son más difíciles de digerir de lo que hubiera pensado Atwater, de manera que solo obtenemos dos terceras partes de sus calorías. En cambio, podemos metabolizar todas las calorías de la crema de almendra.

También digerimos de forma menos eficiente los granos enteros, la avena y ciertos cereales ricos en fibra. En un estudio reciente comparamos qué sucedía con la ingesta de dietas ricas en cereales integrales, que incluían unos 30 gramos de fibra, frente a la alimentación más típica estadounidense, con la mitad de contenido en fibra. Detectamos una mayor pérdida de calorías en las heces y una aceleración del metabolismo. Estos dos aspectos juntos suponen una diferencia neta de casi 100 kilocalorías al día, lo que puede influir de forma sustancial en nuestro peso a lo largo de los años.

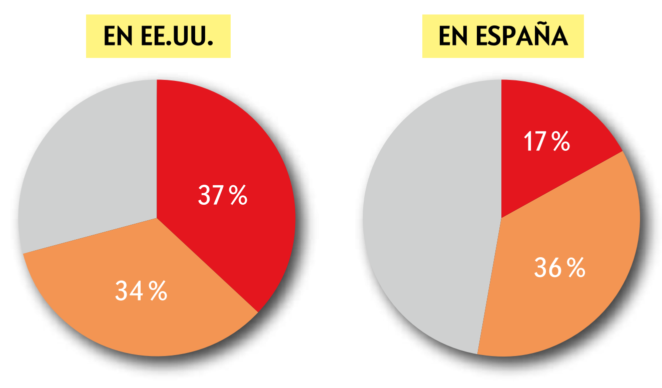
Nuestro grupo y otros han demostrado así que no todas las calorías son iguales, al menos por lo que respecta a los frutos secos y los cereales de alto contenido en fibra. A medida que aprendamos más sobre la eficiencia con la que el cuerpo digiere diferentes alimentos y cómo afectan a la tasa metabólica basal, iremos viendo otros ejemplos de estas disparidades, las cuales influyen en lo fácil o difícil que les resulta a las personas mantener el peso.

GASTO ENERGÉTICO

Si en un lado de la ecuación del equilibrio energético tenemos lo que ingerimos, en el otro se halla el modo en que el cuerpo gasta esa energía. Los investigadores están descubriendo una enorme variabilidad en este aspecto también.

Uno de los consejos más frecuentes que reciben las personas que intentan adelgazar es que deben hacer más ejercicio. Sin duda, la actividad física contribuye a mantener en buen estado

POBLACIÓN ADULTA OBESA O CON SOBREPESO



FUENTES: CENTROS PARA EL CONTROL Y LA PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES DE EE.UU.; ENCUESTA EUROPEA DE SALUD EN ESPAÑA. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, 2014.

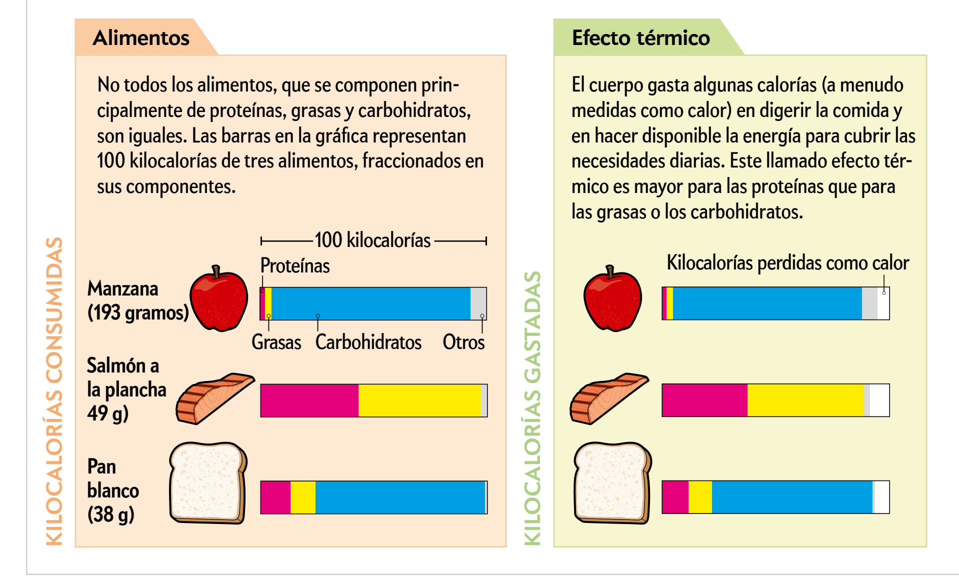
el corazón, el cerebro, los huesos y otras partes del organismo. Pero los cálculos más precisos realizados por nuestro grupo y otros demuestran que la actividad física solo contribuye a una tercera parte del gasto energético total del cuerpo (suponiendo que el peso corporal se mantiene estable). El metabolismo corporal basal, es decir, la energía que necesita para mantener sus funciones en estado de reposo, representa las otras dos terceras partes. Curiosamente, los órganos que más energía precisan son el cerebro y otros órganos internos, como el corazón y los riñones. La musculatura esquelética no necesita tanta, si bien un entrenamiento dirigido a ganar fuerza puede aumentar algo el metabolismo basal.

Además, como puede entender cualquiera que haya alcanzado la madurez, con el tiempo el metabolismo cambia. Los ancianos necesitan menos calorías para el mantenimiento del cuerpo que cuando eran jóvenes. A su vez, el metabolismo basal difiere de una persona a otra. Un estudio publicado en 1986 midió ese parámetro en 130 personas de 54 familias. Considerando las diferencias de edad, sexo y composición corporal, encontraron variaciones de hasta 500 kilocalorías al día entre las distintas familias. La ineludible conclusión es que, por lo que respecta al metabolismo basal y, por tanto, a la capacidad de perder peso o mantenerlo, la herencia familiar sí influye.

HALLAZGOS

La ecuación energética

Los organismos se rigen por las leyes de la termodinámica, como ocurre en todo en el universo. El número de calorías que obtenemos de los alimentos debe igualarse con el que gastamos o almacenamos en el cuerpo. Los métodos más sencillos para equilibrar esta ecuación no son necesariamente los que se aplican en la vida real. Por ejemplo, no todas las personas procesan los alimentos con la misma eficiencia. Y cada individuo necesita una determinada cantidad de energía para mantener su cuerpo en funcionamiento. El gráfico ilustra algunas de las complejidades conocidas.



FUENTES: DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE EE.UU. BASES DE DATOS DE COMPOSICIÓN DE ALIMENTOS (*datos de alimentos*); «HIGH-PROTEIN WEIGHT-LOSS DIETS: ARE THEY SAFE AND DO THEY WORK? A REVIEW OF THE EXPERIMENTAL AND EPIDEMIOLOGIC DATA», POR JULIE EISENSTEIN ET AL., EN *NUTRITION REVIEWS*, VOL. 60, N.º 7, JULIO DE 2002 (*datos del efecto térmico*)

Vamos a suponer que hemos comenzado a adelgazar. La lógica dice que nuestro metabolismo basal y nuestros requisitos energéticos caerán a medida que nuestro cuerpo disminuya de tamaño, lo que implica que la pérdida de peso también se enlentecerá. Se trata de una pura cuestión de física, en la que se aplica la primera ley de la termodinámica. Pero, por otro lado, el organismo se halla sometido a las presiones de la evolución, que favorece a aquellos individuos que almacenan de forma más eficiente la energía. Así, los estudios demuestran que el metabolismo basal disminuye más de lo esperado en la fase activa de adelgazamiento. Una vez estabilizado el nuevo peso, el ejercicio puede ayudar a mantenerlo al compensar el menor gasto energético que tiene un cuerpo de menor tamaño.

CEREBROS HAMBRIENTOS

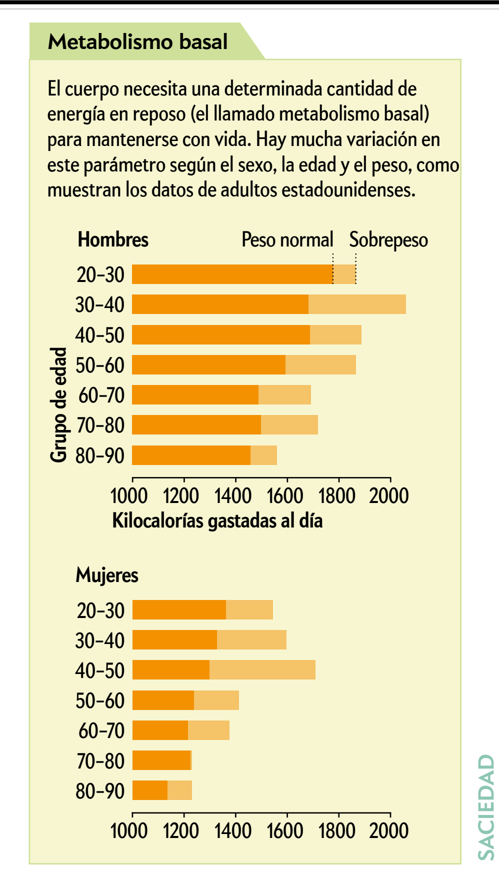
Además de las variaciones en los factores de Atwater y de la tasa metabólica, entran en juego otros aspectos. Un creciente número de pruebas demuestra que el cerebro desempeña un papel fundamental, al coordinar las señales procedentes de una variedad de sensores fisiológicos en el cuerpo, a la vez que nos avisa de la presencia de comida. El cerebro genera la sensación de hambre y tentación para asegurarse de que comamos.

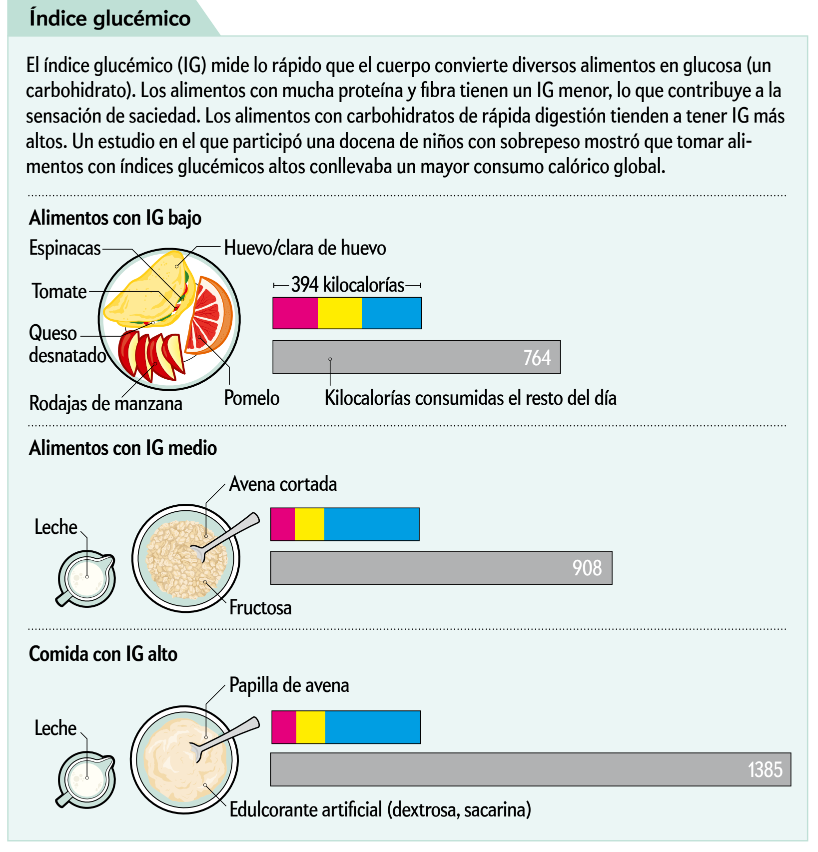
En otras palabras, el objetivo del hambre ha sido siempre mantenernos con vida. Por eso no tiene sentido luchar a contracorriente. En lugar de ello, una de las claves para que adelgacemos consiste precisamente en evitar que surja el apetito y la tentación de comer.

Los estudios realizados en nuestro laboratorio y en otros demuestran que los alimentos más ricos en proteínas o fibra, o los que no producen picos bruscos de azúcar (glucosa) en la sangre, sacian más y controlan mejor la sensación de hambre. (Los carbohidratos son la fuente más común de glucosa en la sangre, pero las proteínas también la pueden generar.) Una revisión publicada por uno de nosotros (Roberts) en el 2000 indicaba que el consumo de calorías en las horas siguientes a un desayuno de alto índice glucémico (por ejemplo, a base de cereales procesados) era un 29 por ciento superior al que tenía lugar tras una comida con un índice glucémico bajo (a base de avena cortada o huevos revueltos).

De hecho, nuestro equipo ha obtenido datos preliminares que demuestran que puede reducirse el apetito mientras se adelgaza si se eligen los alimentos adecuados. Primero pedimos a 133 voluntarios que contestaran un exhaustivo cuestionario acerca de cada cuánto, cuándo y cuán intensamente sentían hambre. A continuación, los asignamos al azar a uno de dos grupos: en el primero seguían un programa de adelgazamiento a base de alimentos ricos en proteínas y fibra y con índices glucémicos bajos (pescado, judías, manzanas, verduras, pollo a la plancha y trigo en grano, por ejemplo); en el segundo, el grupo de control, se mantenían en «lista de espera».

A lo largo de los siguientes seis meses, el grupo experimental presentó niveles de apetito progresivamente menores y por debajo de los medidos al inicio del ensayo. También registramos diferencias en la báscula: al final del estudio habían perdido de media 8 kilos, mientras que los del grupo de control habían ganado 0,9 kilos.





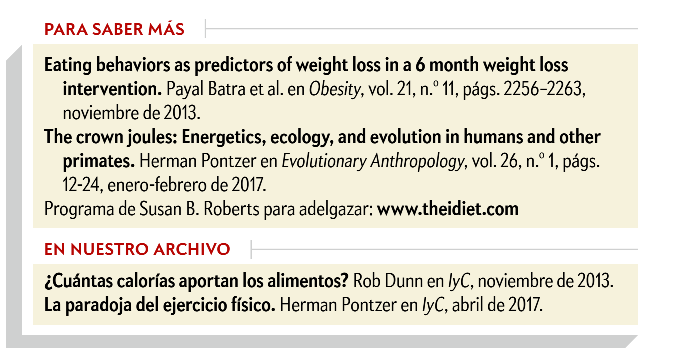
FUENTES: *HUMAN ENERGY REQUIREMENTS: REPORT OF A JOINT FAO/WHO/UNU EXPERT CONSULTATION.* ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, FAO Y UNIVERSIDAD DE LAS NACIONES UNIDAS, 2001 (*datos del metabolismo basal*); «HIGH GLYCEMIC INDEX FOODS, OVEREATING, AND OBESITY», POR DAVID S. LUDWIG ET AL. EN *PEDIATRICS*, VOL. 103, N.º 3, MARZO DE 1999 (*datos del índice glucémico*); BROWN BIRD DESIGN (*ilustraciones*); AMANDA MONTAÑEZ (*gráficas*)

De modo interesante, el grupo experimental presentó también menos episodios de ansiedad por la comida, lo que indica que su cerebro percibía de manera distinta lo que le resultaba placentero. A continuación obtuvimos neuroimágenes de 15 voluntarios mientras miraban fotografías de distintas comidas. Los resultados revelaron que, con el tiempo, el centro de recompensa del cerebro de los sujetos del grupo experimental se activaba cada vez más ante las imágenes de pollo a la plancha, bocadillos de trigo integral y cereales ricos en fibra. Además, cada vez respondía menos a las de patatas fritas, pollo frito, bombones y otras comidas que engordan.

DIETAS PERSONALIZADAS

Las diferencias entre alimentos en cuanto a su capacidad de saciar el apetito, la eficacia con la que los absorbemos y la posibilidad real, aunque limitada, de nuestro metabolismo para adaptarse a los cambios en el aporte energético convierten el control del peso en un proceso complejo. Seguimos detectando circunstancias especiales que afectan de distinto modo a diferentes personas. Se sabe, por ejemplo, que la mayoría de los sujetos obesos segregan concentraciones proporcionalmente mayores de insulina, la hormona que ayuda a metabolizar la glucosa. Este efecto, denominado resistencia a la insulina, también da lugar a otros problemas metabólicos, como un mayor riesgo de infarto de miocardio o de desarrollar diabetes de tipo 2. Cuando a estos sujetos los sometimos a un programa de adelgazamiento de seis meses de duración, a base de una dieta rica en proteínas y fibras, pobre en carbohidratos y de bajo índice glucémico, constatamos que perdían más peso de lo que lo hubieran hecho con una dieta rica en carbohidratos y con un índice glucémico más elevado. En cambio, las personas con niveles más bajos de insulina respondían igual de bien a dietas con mayor o menor proporción de proteínas y carbohidratos, e indistintamente del índice glucémico.

Hoy seguimos ayudando a nuestros voluntarios a perder peso y mantenerlo en ensayos clínicos. A pesar de que nuestro estudio original con 133 personas descrito antes duró seis meses y requirió que los participantes acudieran a reuniones semanales y contestaran a frecuentes correos electrónicos, solo un 11 por ciento abandonó el programa. Algunos incluso lloraron en la última visita del equipo de investigadores porque lamentaban despedirse. No solo habían adelgazado, sino que lo habían hecho más de lo esperado y se sentían transformados psicológicamente, además de físicamente. «La ciencia ha funcionado», fueron las palabras de uno de los participantes. IyC



PARA SABER MÁS

Eating behaviors as predictors of weight loss in a 6 month weight loss intervention. Payal Batra et al. en *Obesity*, vol. 21, n.º 11, págs. 2256-2263, noviembre de 2013.

The crown joules: Energetics, ecology, and evolution in humans and other primates. Herman Pontzer en *Evolutionary Anthropology*, vol. 26, n.º 1, págs. 12-24, enero-febrero de 2017.

Programa de Susan B. Roberts para adelgazar: **www.theidiet.com**

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Cuántas calorías aportan los alimentos? Rob Dunn en *IyC*, noviembre de 2013.

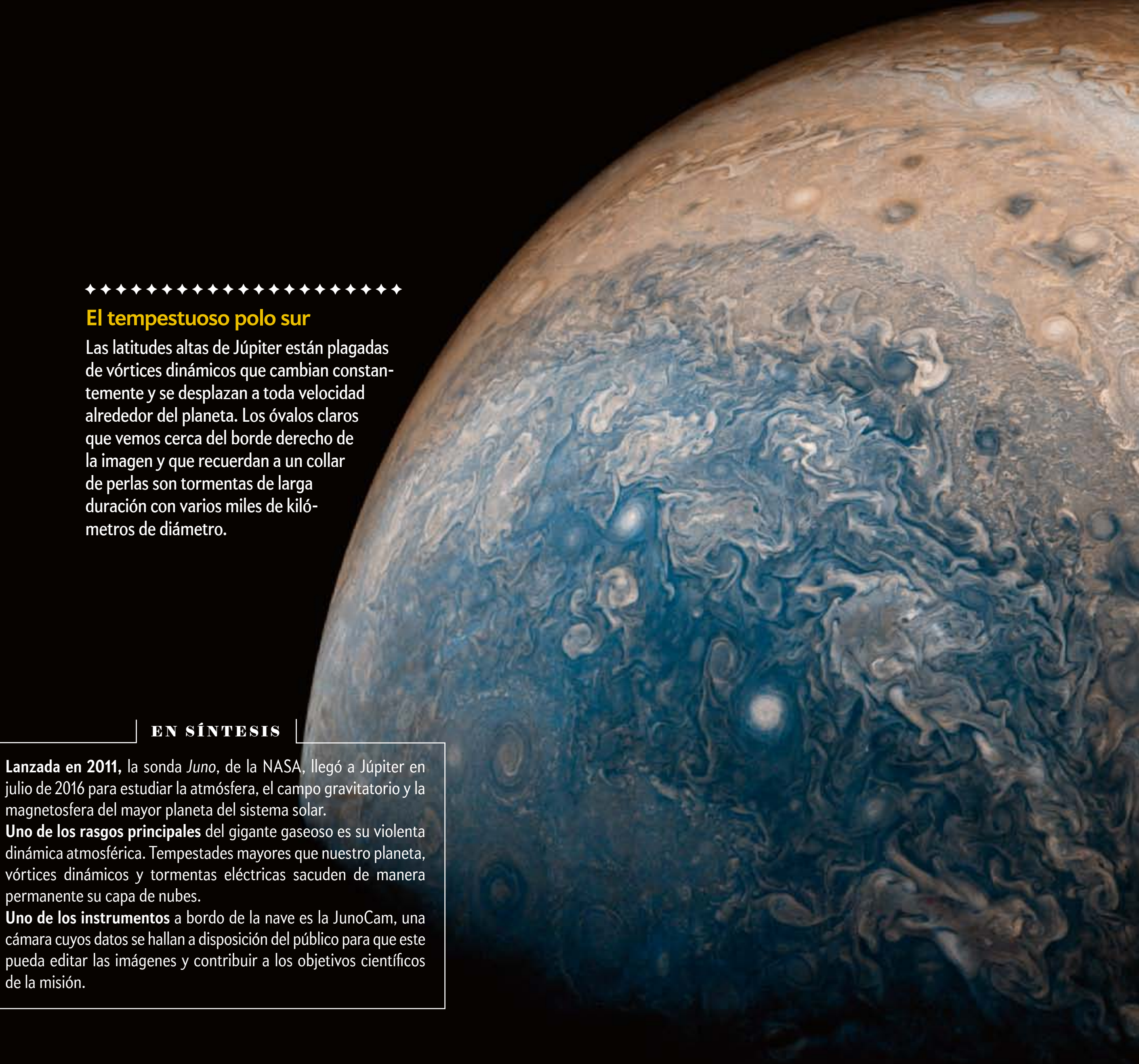
La paradoja del ejercicio físico. Herman Pontzer en *IyC*, abril de 2017.

SISTEMA SOLAR

JUNO SOBRE JÚPITER

La última misión de la NASA al gigante gaseoso está permitiendo explorar con un detalle inusitado su turbulenta atmósfera

Tilmann Althaus



El tempestuoso polo sur

Las latitudes altas de Júpiter están plagadas de vórtices dinámicos que cambian constantemente y se desplazan a toda velocidad alrededor del planeta. Los óvalos claros que vemos cerca del borde derecho de la imagen y que recuerdan a un collar de perlas son tormentas de larga duración con varios miles de kilómetros de diámetro.

EN SÍNTESIS

Lanzada en 2011, la sonda *Juno*, de la NASA, llegó a Júpiter en julio de 2016 para estudiar la atmósfera, el campo gravitatorio y la magnetosfera del mayor planeta del sistema solar.

Uno de los rasgos principales del gigante gaseoso es su violenta dinámica atmosférica. Tempestades mayores que nuestro planeta, vórtices dinámicos y tormentas eléctricas sacuden de manera permanente su capa de nubes.

Uno de los instrumentos a bordo de la nave es la JunoCam, una cámara cuyos datos se hallan a disposición del público para que este pueda editar las imágenes y contribuir a los objetivos científicos de la misión.

Tilmann Althaus es doctor en mineralogía y ciencias de la Tierra y redactor de *Sterne und Weltraum*.



Desde hace un año y medio, la sonda espacial *Juno*, de la NASA, orbita alrededor de Júpiter, acercándose en cada vuelta a pocos miles de kilómetros de su colorida y turbulenta capa de nubes. En esas incursiones *Juno* ha obtenido una infinidad de imágenes fantásticas. Ninguna nave espacial había llegado tan cerca del gigante gaseoso ni había logrado fotografiar de manera tan impactante su atmósfera, agitada por implacables tormentas. Algunas instantáneas dan la sensación de haber sido tomadas desde un avión en vuelo rasante. La cantidad de tormentas que pueden apreciarse en ellas asciende a miles.

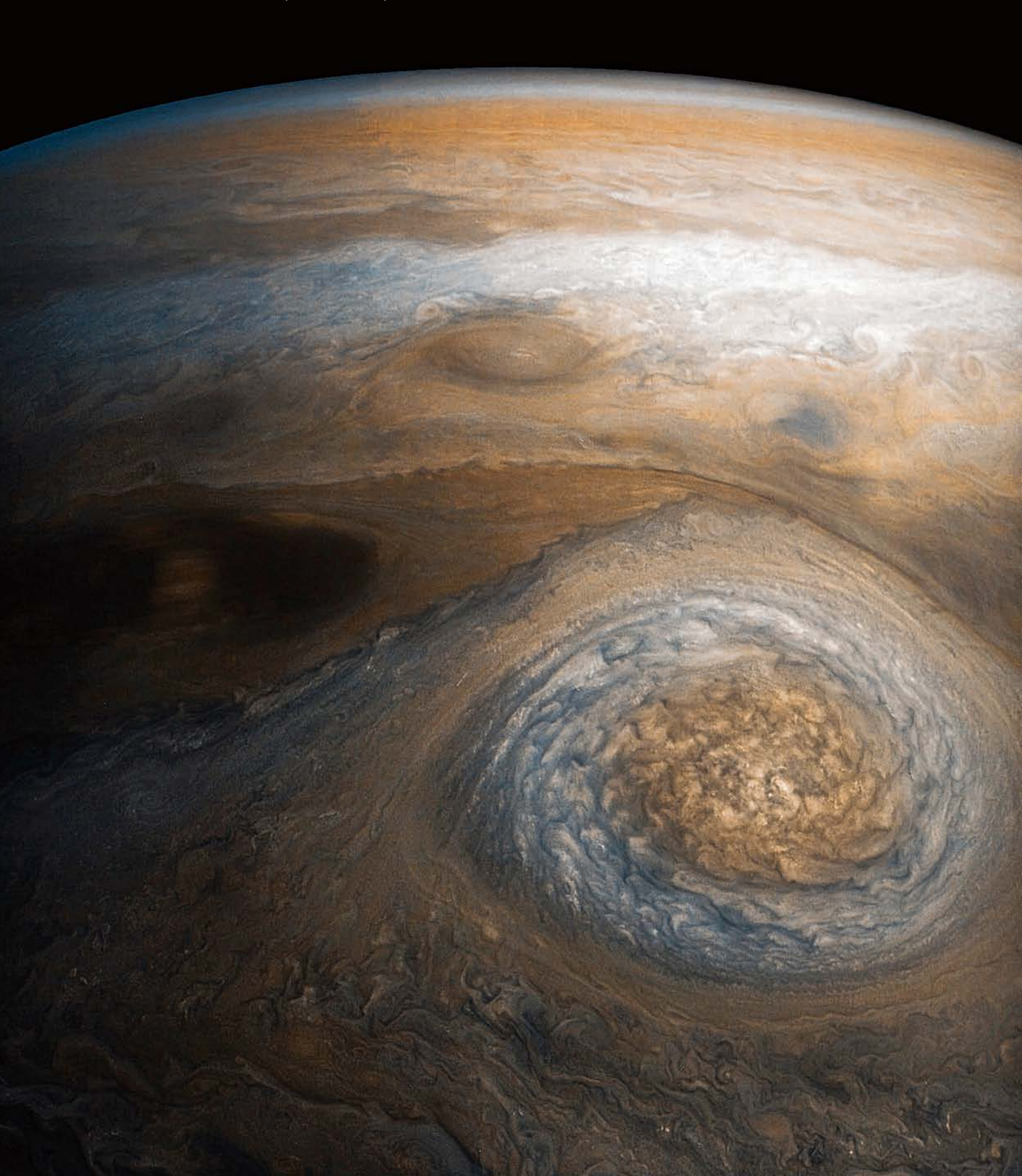
Las imágenes de la Gran Mancha Roja, el mayor anticiclón del sistema solar, muestran detalles que habían permanecido ocultos para todos los telescopios terrestres y misiones espaciales previas. Bastante mayor que nuestro planeta, este vórtice atmosférico fue observado por vez primera hace siglos. Sin embargo, su asombrosa longevidad sigue planteando un misterio de primer orden para los planetólogos.

Las imágenes que reproducimos aquí han sido captadas con la JunoCam, una cámara muy especial por cuanto la planificación de sus observaciones y el procesado de las imágenes recaen principalmente en el público. Todas las fotografías han sido generadas por diestros editores aficionados que, con gran entusiasmo y pasión por los detalles, han procesado los datos suministrados por la NASA y las han presentado en el sitio web del instrumento: www.missionjuno.swri.edu/junocam. El peculiar aspecto de algunas de las imágenes de la JunoCam se debe a su sistema óptico, un objetivo de gran angular que abarca un enorme campo de visión. Esta lente de ojo de pez ha permitido retratar áreas inmensas de la atmósfera joviana incluso a distancias de pocos miles de kilómetros.

NASA/INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DEL SUROESTE/MALIN SPACE SCIENCE SYSTEMS/GERALD EICHSTÄDT/SEÁN DORAN

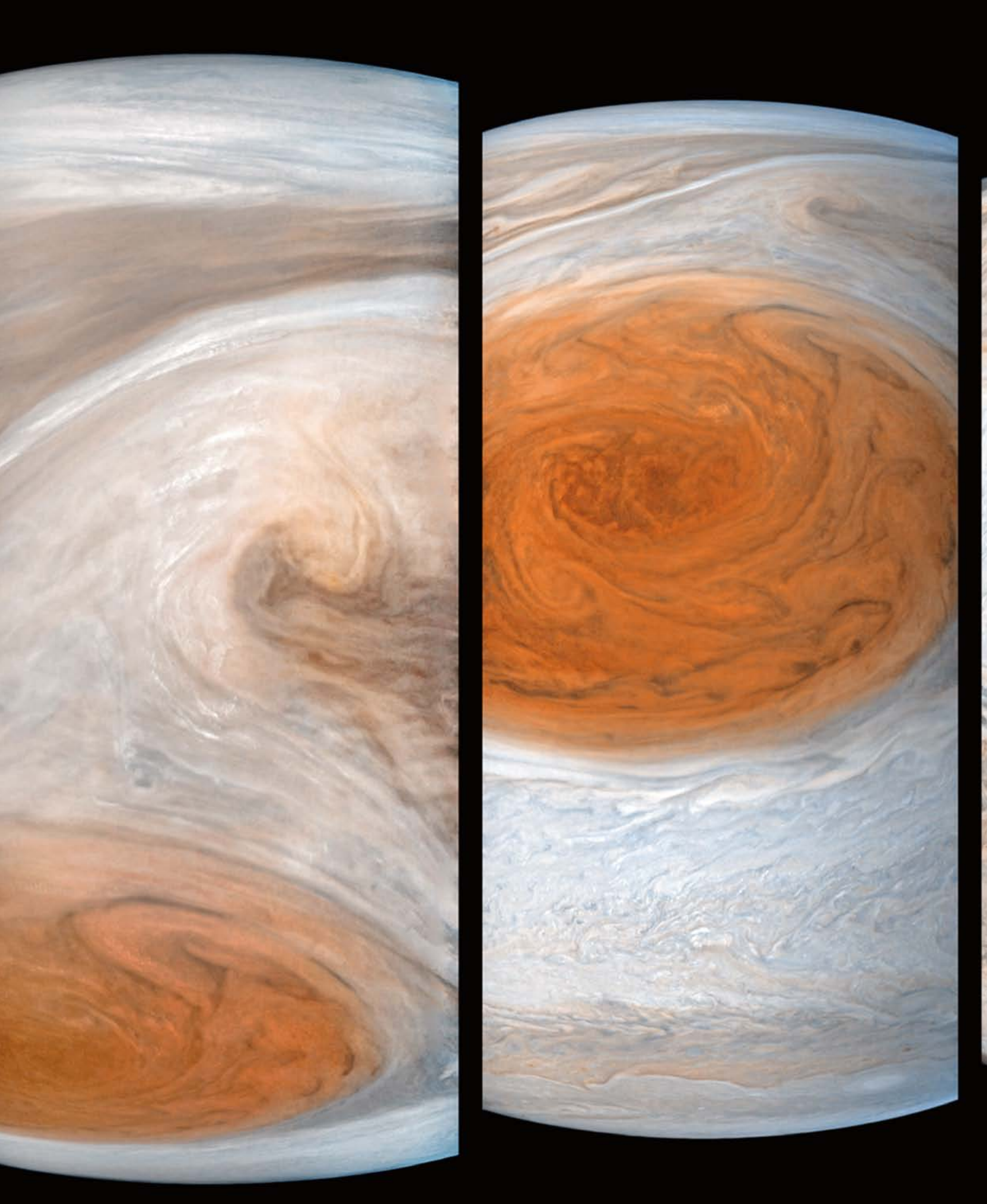
El torbellino tropical del norte

Esta formidable tormenta, conocida desde hace decenios, corretea por las latitudes septentrionales bajas. Con los años va cambiando de color, de blanco a rojizo para luego palidecer de nuevo. Cuando *Juno* la fotografió, el 11 de julio de 2017, la nave se hallaba a unos 11.500 kilómetros de la capa de nubes de Júpiter.



Tormentas, vórtices y guirnaldas de nubes

Una vista sobre el polo sur de Júpiter ha puesto por primera vez a nuestro alcance sus latitudes altas, imposibles de observar desde la Tierra debido a la pequeña inclinación axial del planeta. En los polos (el norte es muy similar al sur) se aprecian un sinnúmero de caóticos vórtices, muchos de los cuales superan los 1000 kilómetros de diámetro. Se encuentran gobernados por vientos tan veloces que los huracanes de la Tierra parecerían suaves brisas en comparación.



La mayor tormenta del sistema solar

En julio del año pasado, *Juno* se acercó por primera vez a la Gran Mancha Roja, una gigantesca tormenta 1,3 veces mayor que la Tierra. Conocida desde hace siglos, los expertos aún ignoran a qué se debe su característico color rojizo. Sospechan que puede estar provocado por compuestos de fosfano (PH_3) y moléculas orgánicas, aunque también barajan otras posibilidades. En este gigantesco vórtice soplan vientos de hasta 400 kilómetros por hora.



NASA/INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DEL SUROESTE/MALIN SPACE SCIENCE SYSTEMS/GERALD EICHSTÄDT/JUSTIN COWART



✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦

El ojo del cíclope

En esta fotografía, la Gran Mancha Roja parece un ojo con su pupila. La imagen ha sido editada para compensar la distorsión causada por el objetivo de la JunoCam (compárese con la cuarta fotografía de la serie «La mayor tormenta del sistema solar»). El contraste y los colores se han alterado para realzar los detalles de las nubes; en particular, en la Gran Mancha Roja.



✦✦

¿Tempestad eléctrica?

En Júpiter hay también fuertes tormentas eléctricas. Ya en 1979 las sondas *Voyager* fotografiaron potentes descargas de rayos. En la zona más clara del centro de esta imagen podemos distinguir varias nubes de tipo cúmulo. Son diminutas solo en apariencia: en realidad, presentan una altura de unos 50 kilómetros, por lo que resultan inmensas en comparación con las terrestres. Estas nubes pueden contener grandes cantidades de agua, si bien los instrumentos de *Juno* no pudieron aclarar si en ellas se produjeron descargas eléctricas.

Un infierno multicolor

En la capa superior de la atmósfera de Júpiter no parece haber lugar tranquilo. Hasta donde llega la resolución de esta imagen, pueden verse vórtices de todos los tamaños y con distintos sentidos de rotación. Los óvalos blancos miden entre 4000 y 5000 kilómetros de ancho. La violenta dinámica atmosférica de Júpiter puede atribuirse a la contracción paulatina que sufre el planeta. Este fenómeno provoca que irradie unas 2,5 veces más calor que el que recibe del Sol, lo que inyecta grandes cantidades de energía a la atmósfera.



PARA SABER MÁS

Jupiter's interior and deep atmosphere: The initial pole-to-pole passes with the Juno spacecraft. S. J. Bolton et al. en *Science*, vol. 356, págs. 821-825, mayo de 2016.

Página web de la misión Juno: **www.nasa.gov/mission_pages/juno/main/index.html**

Página web de la JunoCam: **www.missionjuno.swri.edu/junocam**

EN NUESTRO ARCHIVO

La Gran Mancha Roja de Júpiter. Agustín Sánchez Lavega en *IyC*, septiembre de 1990.

La cosecha de la misión Galileo. Torrence V. Johnson en *IyC*, abril de 2000.

El enigma de las bandas de Júpiter. Simon Cabanes, Benjamin Favier y Michael Le Bars, *en este mismo número*.

SISTEMA SOLAR

EL ENIGMA DE LAS BANDAS DE JÚPITER

La estructura de la atmósfera joviana parece desafiar la mecánica de fluidos. Los experimentos de laboratorio y los datos de la sonda *Juno* podrían zanjar pronto la cuestión

Simon Cabanes, Benjamin Favier y Michael Le Bars

Conocido desde la Antigüedad, Júpiter dejó de ser un mero punto errante en el firmamento gracias a la invención del telescopio. Si lo observamos con uno, aunque sea de aficionado, veremos un planeta lleno de tempestades y remolinos, como la Gran Mancha Roja, conocida desde hace más de trescientos años, pero también magníficas bandas de color pardo, blanco y ocre paralelas al ecuador.

Dichas bandas fueron dibujadas por primera vez por el clérigo y astrónomo italiano Niccolò Zucchi en 1630, y posteriormente descritas por numerosos astrónomos, como Jean-Dominique Cassini y Christian Huygens en el siglo XVII. En la actualidad, el telescopio espacial Hubble ha logrado fotografiarlas con un detalle excepcional. Sin embargo, siguen intrigando a los planetólogos, quienes intentan entender sus procesos de formación y, sobre todo, la gran estabilidad de estas estructuras de miles de kilómetros de extensión. Ahora, gracias a los datos de la sonda *Juno*, de la NASA, así como a nuevas simulaciones de las atmósferas planetarias y experimentos de laboratorio, estamos comenzando a comprender los mecanismos subyacentes a las bandas de Júpiter. Además, tal y como sugieren las observaciones de Saturno, dichos procesos parecen ser comunes a todos los planetas gigantes.

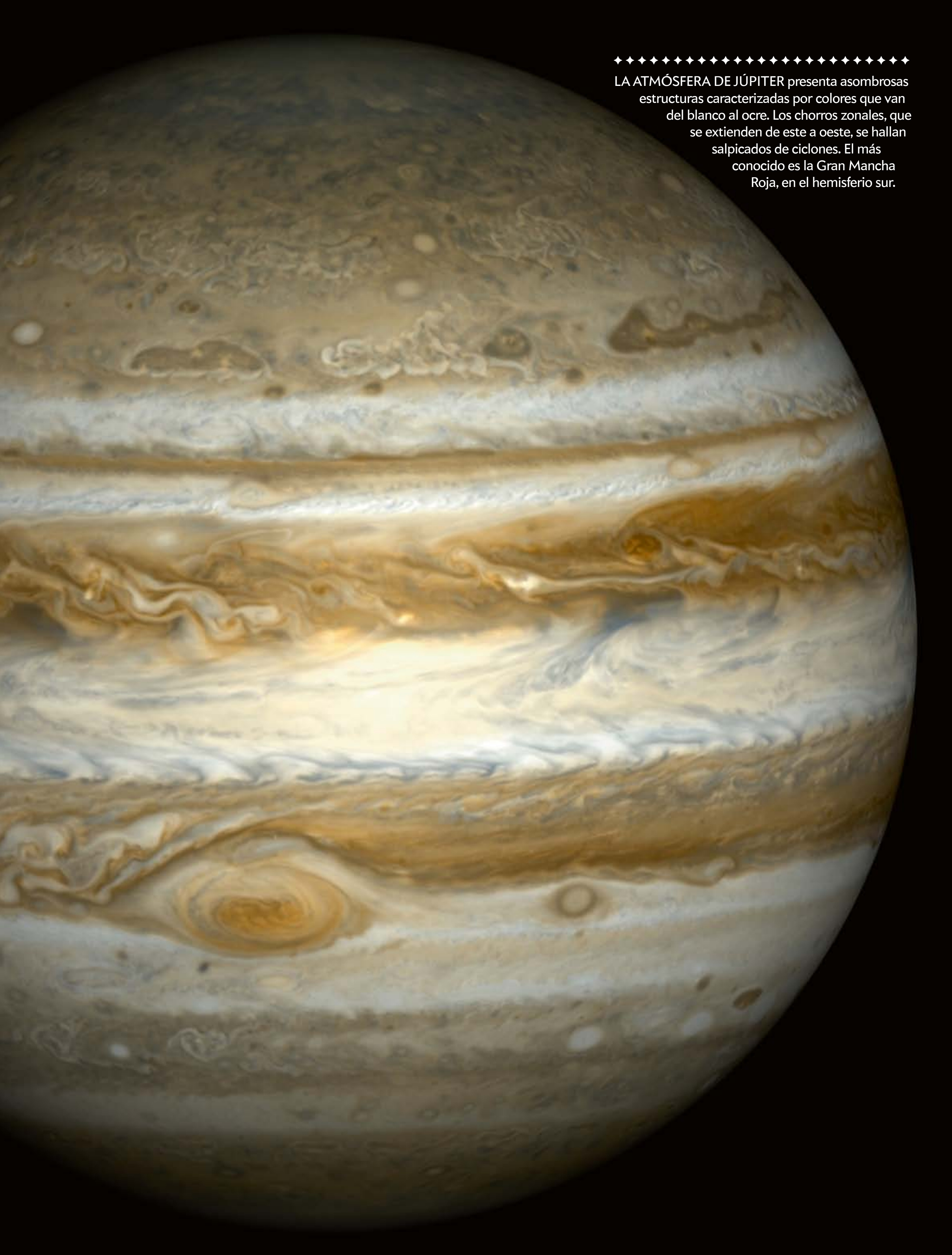
Las bandas de Júpiter están formadas por distintas capas de nubes que recubren todo el planeta. Estas son impulsadas por fuertes y persistentes vientos dirigidos alternativamente hacia el este y hacia el oeste, con velocidades que pueden alcanzar los 600 kilómetros por hora. Hablamos por ello de «chorros zonales»; es decir, flujos intensos y localizados. Esta secuencia de bandas alternativas constituye la huella visible de la potente actividad de la atmósfera joviana.

EN SÍNTESIS

Entre los enigmas que plantea Júpiter, la formación de bandas atmosféricas que se extienden de este a oeste intriga desde hace años a planetólogos y expertos en mecánica de fluidos.

En una atmósfera turbulenta, tales estructuras deberían ser inestables y desaparecer con rapidez. Dos modelos teóricos aspiran a explicar su origen.

Para discriminar entre ellos se emplean simulaciones numéricas y experimentos de laboratorio. La sonda *Juno*, actualmente en órbita alrededor de Júpiter, aportará también valiosa información.



✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦✦

LA ATMÓSFERA DE JÚPITER presenta asombrosas estructuras caracterizadas por colores que van del blanco al ocre. Los chorros zonales, que se extienden de este a oeste, se hallan salpicados de ciclones. El más conocido es la Gran Mancha Roja, en el hemisferio sur.

Simon Cabanes es investigador posdoctoral en el Laboratorio de Meteorología Dinámica de París.

Benjamin Favier es investigador del CNRS en el Instituto para la Investigación de Fenómenos Fuera del Equilibrio, en Marsella.

Michael Le Bars es investigador del CNRS en el Instituto para la Investigación de Fenómenos Fuera del Equilibrio, en Marsella.

Además de las observaciones terrestres, son varias las misiones espaciales que han estudiado el planeta gigante. Su exploración comenzó en 1973 con el sobrevuelo de la sonda *Pioneer 10* y, un año más tarde, con la *Pioneer 11*. Estas misiones proporcionaron datos sobre la existencia de una enorme y potente magnetosfera que alberga un intenso cinturón de radiación. Más tarde, otras naves ampliaron nuestro conocimiento de la atmósfera y la magnetosfera de Júpiter durante su periplo hacia otros objetivos: *Ulises* en 1992, *Cassini-Huygens* en 2000, *New Horizons* en 2007. A ellas hay que añadir las sondas *Voyager*, que en 1979 descubrieron la existencia de anillos, varias lunas, así como una actividad volcánica excepcional en una de ellas, Ío. Con anterioridad, solo *Galileo*, entre 1995 y 2003, había permanecido en órbita alrededor de Júpiter. Esta misión envió una pequeña nave hacia el interior de la atmósfera del planeta, donde analizó la composición de sus capas superiores en un descenso progresivo hasta que fue aplastada por la presión.

Hoy el interés está puesto en *Juno*, en órbita del gigante gaseoso desde julio de 2016. Situada en una trayectoria elíptica para limitar su paso a través del cinturón de radiación, la sonda efectúa un sobrevuelo en cada órbita a tan solo 5000 kilómetros de la capa de nubes. Equipada con una cámara en color y otros ocho instrumentos, la misión obtendrá datos sobre la atmósfera, su composición y su interacción con el campo magnético, pero también sobre la dinámica de las bandas zonales y, quizá, sobre la existencia de un posible núcleo sólido.

UN PLANETA GIGANTE Y LIGERO

Con un radio que supera en once veces al terrestre, Júpiter es el mayor planeta del sistema solar. Sin embargo, es también sorprendentemente ligero, ya que su masa es solo 318 veces la de la Tierra: cuatro veces menos de lo que cabría esperar si sus densidades fueran equivalentes. De hecho, Júpiter se compone en su mayor parte de hidrógeno y helio. Estos elementos se hallan en estado gaseoso en la atmósfera, donde también hay trazas de amoniaco (NH_3), hidrosulfuro de amonio (H_5NS) y agua. Aunque en cantidades inferiores al 1 por ciento, estos compuestos no carecen de importancia, ya que se hallan en el origen de las distintas capas de nubes del planeta.

Nuestro conocimiento de la estructura profunda es mucho más parcial y especulativo. Al proseguir hacia el interior, la presión transforma el gas en una niebla cada vez más densa y luego en un manto líquido. Hacia los 7000 u 11.000 kilómetros bajo la capa de nubes, los átomos de hidrógeno se ionizan y forman un fluido conductor cuyo movimiento engendra el potente campo magnético del astro. Por último, a más de 60.000 kilómetros de profundidad quizá se halla una superficie sólida, lo que señalaría la presencia de un núcleo rocoso de tamaño igual o mayor a toda la Tierra. A diferencia de nuestro planeta, que posee límites claros entre atmósfera, océanos, manto sólido de silicatos y núcleo de hierro líquido y luego sólido, casi todo Júpiter parece estar compuesto por un medio continuo, sin una separación clara entre la atmósfera y el interior. Como consecuencia, todo modelo que aspire a explicar su dinámica habrá de ser muy distinto de los modelos terrestres.

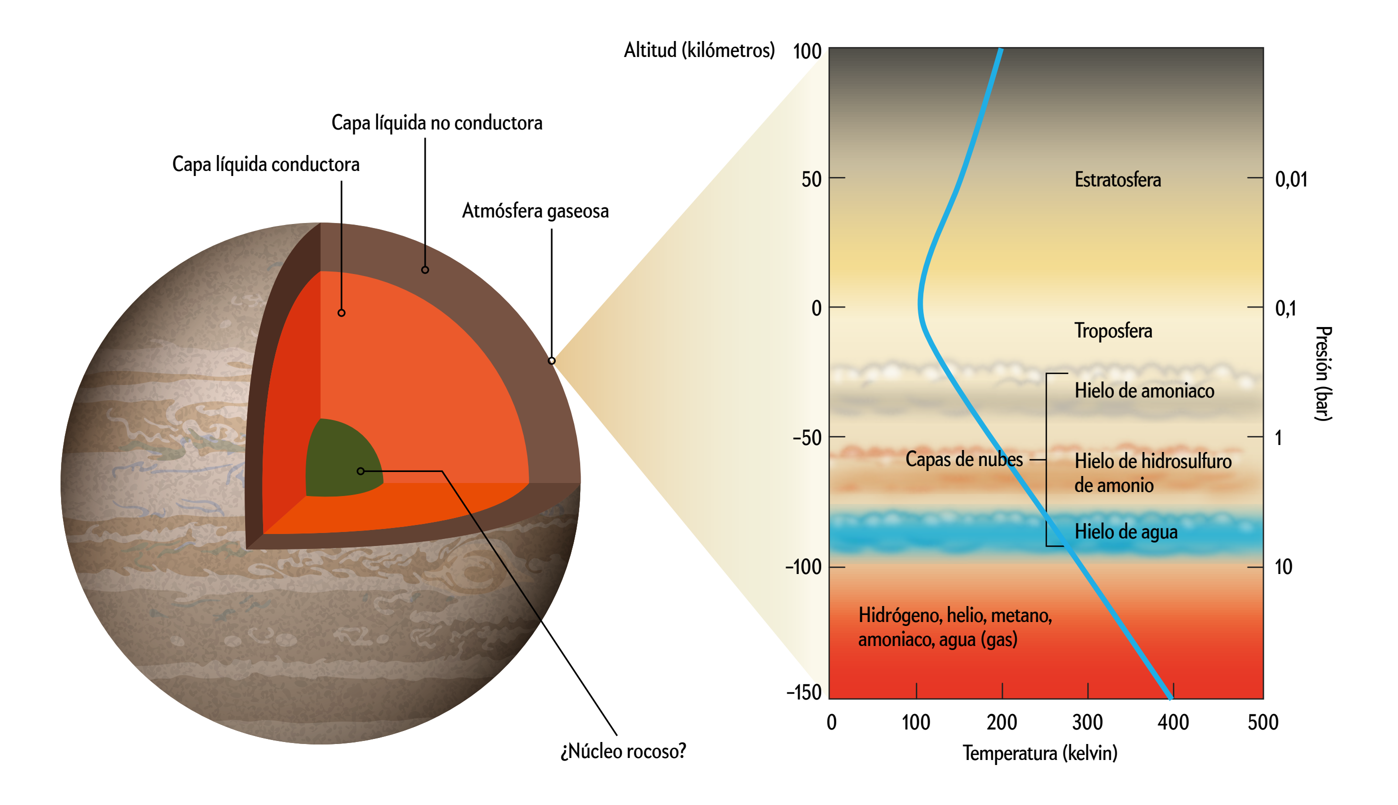
En la Tierra, los movimientos atmosféricos se rigen principalmente por el calentamiento solar y la absorción en superficie, lo que determina la meteorología y el movimiento de las grandes masas de nubes. Por su parte, el calor interno de la Tierra (debido a la energía almacenada durante la formación del planeta, la radioactividad, los cambios de fase y otros factores) es responsable de los procesos de convección en el manto, de la tectónica de placas y de los movimientos del núcleo líquido que originan el campo magnético. En Júpiter, sin embargo, estas dos fuentes de calor se combinan para agitar total o parcialmente la masa gaseosa y líquida de hidrógeno y helio. Las bandas del planeta constituyen la traza visible de estos procesos, pero su verdadera profundidad, su fuente principal de energía y la forma en que esta se organiza siguen siendo objeto de debate.

Para un físico, la existencia de tales estructuras de gran tamaño, como las bandas zonales, la Gran Mancha Roja o incluso los ciclones en la Tierra, constituye un viejo problema que parece contradecir los principios de la física de fluidos. Los movimientos atmosféricos son muy energéticos y, por tanto, se hallan sujetos a una gran turbulencia. Este fenómeno queda bien resumido en un poema escrito en 1912 por el matemático británico Lewis Fry Richardson: «Las espirales grandes contienen otras pequeñas, que se alimentan de su velocidad, y estas poseen otras menores, y así hasta la viscosidad». Dicho de otro modo, la turbulencia da lugar a un gran número de estructuras arremolinadas que interaccionan entre sí y que conducen continuamente a la formación de torbellinos cada vez menores, hasta que la viscosidad del fluido (el conjunto de fenómenos internos que se oponen a su movimiento) actúa y disipa energía. Es así como, por ejemplo, una gota de leche se mezcla en el café al remover el líquido con rapidez.

Este fenómeno de «cascada turbulenta» constituye la causa de numerosos procesos en mecánica de fluidos. Por tanto, lo natural es que un flujo turbulento a gran escala se desestabilice y tienda a crear estructuras cada vez más localizadas, pero no que origine enormes bandas coherentes como las que pueblan la superficie de Júpiter.

TURBULENCIA BIDIMENSIONAL

No obstante, si bien esta cascada turbulenta se observa en sistemas tridimensionales, ocurre exactamente lo contrario si el flujo turbulento tiene lugar en solo dos dimensiones; es decir, si el movimiento queda confinado a una superficie. En tal caso, los remolinos se tornan cada vez mayores, un fenómeno conocido como «cascada inversa», por oposición a la cascada «directa» del caso tridimensional. Partiendo de un flujo a pequeña escala, se originan otros más intensos de tamaño mayor, semejantes a los ciclones y anticiclones de la atmósfera terrestre: exactamente lo que necesitamos para explicar, al menos en parte, la formación de los chorros zonales de Júpiter. Pero ¿cómo recurrir a este mecanismo en dos dimensiones para estudiar la atmósfera de un planeta que es intrínsecamente tridimensional? Al respecto, hace décadas que existen dos modelos.



JÚPITER SE COMPONE, en su mayor parte, de hidrógeno y helio. Su atmósfera presenta varias capas de nubes de distintos colores. El aumento de la presión que tiene lugar con la profundidad torna la envoltura gaseosa en una niebla más densa y luego en un manto líquido. A unos 7000 kilómetros por debajo de las nubes, el hidrógeno se ioniza y forma una capa conductora cuya dinámica genera el intenso campo magnético del planeta. Los datos de la sonda *Juno*, de la NASA, deberían ayudar a aclarar la posible existencia de un núcleo rocoso.

El primero de ellos, denominado de capa delgada, fue propuesto en los años cincuenta y sesenta del siglo xx por Seymour Hess y Hans Panofsky, así como por Andrew Ingersoll y Jeffrey Cuzzi, quienes se inspiraron en la atmósfera terrestre. La idea se apoya en un confinamiento geométrico del flujo: en un volumen en el que una dimensión es mucho menor que las otras, los movimientos se bloquearán de manera natural en dicha dirección. La capa atmosférica de Júpiter que engloba las nubes superficiales cuenta con un espesor del orden de cien kilómetros, mientras que las dimensiones laterales abarcan decenas de miles de kilómetros. Por tanto, los movimientos verticales podrían despreciarse, por lo que la dinámica atmosférica sería casi bidimensional. Ello permitiría una cascada inversa con formación de grandes estructuras.

El segundo modelo, llamado profundo, fue formulado por Friedrich Busse en 1976. Se basa en un confinamiento dinámico y se funda en los trabajos de Joseph Proudman (1916) y Geoffrey Taylor (1917). Cuando un fluido gira con rapidez, se obstaculizan sus movimientos en la dirección axial, ya que predomina la fuerza de Coriolis, perpendicular al eje de rotación y a la velocidad local del fluido. Ello forma columnas turbulentas orientadas según el eje de rotación en las que el fluido solo circula en el plano perpendicular al eje, por lo que la dinámica resultante es prácticamente bidimensional. La idea se podría aplicar a Júpiter, ya que la velocidad de rotación global del planeta supera en más de diez veces a la de los vientos, por lo que probablemente se alcancen las condiciones de validez del modelo.

Así pues, tanto el modelo de capa delgada como el profundo explican el modo en que la geometría tridimensional de la atmósfera joviana puede dar lugar a una dinámica casi bidimensional, donde la turbulencia sí genera estructuras de gran tamaño. Sin embargo, los enormes remolinos que aparecen en las simulaciones numéricas se parecen a los ciclones y a la Gran Mancha Roja, pero no a las grandes bandas que pueblan la superficie del planeta. ¿Cómo explicarlas?

FORMACIÓN DE BANDAS

En la Tierra, la fuerza de Coriolis resulta clave en la dinámica de los océanos y la atmósfera. Debida a la rotación del planeta, empuja hacia el este una masa de fluido que se desplace del ecuador al polo, o hacia el oeste si el fluido avanza en sentido opuesto. Como consecuencia, los ciclones giran en sentido antihorario en el hemisferio norte y en sentido horario en el sur.

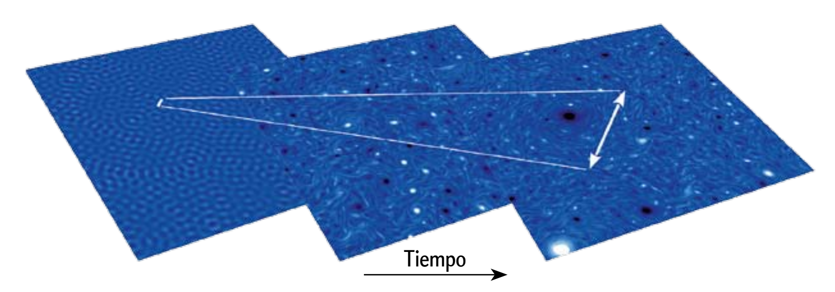
En Júpiter, en el marco del modelo de capa delgada, la situación sería similar, con una fuerza de Coriolis muy importante. La intensidad de esta fuerza depende de la latitud: resulta proporcional a la proyección de la velocidad de rotación del planeta sobre la vertical del punto considerado. Por tanto, toma un valor máximo en los polos y nulo en el ecuador. Esta variación de la vorticidad da origen a un fenómeno ondulatorio: las ondas de Rossby, así llamadas en honor al meteorólogo Carl-Gustaf Rossby, quien las detectó en la atmósfera terrestre en 1939. Estas se propagan preferentemente según la dirección este-oeste y tienden a focalizar la energía acumulada por las estructuras formadas por cascada inversa. Como consecuencia, las estructuras turbulentas en Júpiter aumentan por cascada inversa sin dirección preferencial hasta un tamaño crítico, a partir del cual entran en competencia con las ondas de Rossby. Toda la energía se canaliza entonces en dirección este-oeste, lo que provoca la formación de los chorros zonales.

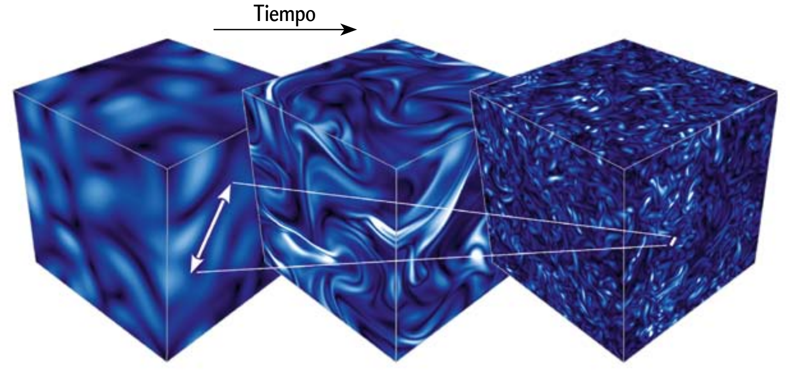
Turbulencia en dos y tres dimensiones

Un fluido turbulento se comporta de distinta manera según su movimiento tenga lugar en dos o en tres dimensiones. En un espacio bidimensional, las pequeñas fluctuaciones tienden a juntarse y a engendrar grandes estructuras, un fenómeno conocido como «cascada inversa» (*arriba*). En cambio, si la dinámica del fluido tiene lugar en tres dimensiones, se observa el fenómeno opuesto: las grandes estructuras desaparecen en beneficio de remolinos cada vez menores; en tal caso, la cascada correspondiente se denomina «directa» (*abajo*).

A la vista de lo anterior, no deja de resultar sorprendente que la atmósfera de Júpiter (un sistema tridimensional) presente estructuras estables de gran tamaño. No obstante, las simulaciones muestran que, en un cubo en rotación, el fluido se organiza en columnas alineadas con el eje y que, en el plano perpendicular, aparecen estructuras similares a las que emergen en dos dimensiones (*abajo*).

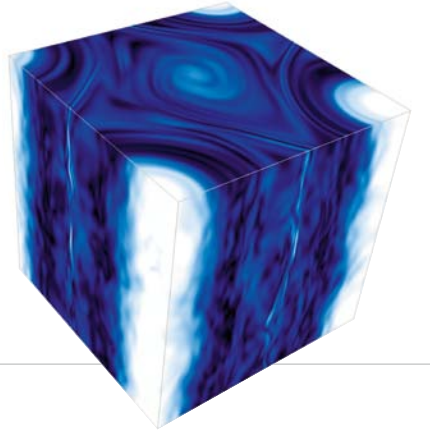
MODELO 2D
Sobre una superficie cuadrada, las fluctuaciones a pequeña escala se organizan progresivamente en remolinos cada vez mayores.





MODELO 3D
En tres dimensiones, un fluido que comienza formando grandes estructuras acabará desestabilizándose y dando lugar a torbellinos menores y más localizados.

MODELO 3D EN ROTACIÓN
Un cubo en rotación se estructura en columnas paralelas al eje; en el plano perpendicular se generan formaciones de gran tamaño similares a ciclones.



CORTESÍA DE BENJAMIN FAVIER

En el caso del modelo profundo, el fluido es tridimensional y se organiza en columnas turbulentas alineadas con el eje de rotación del planeta. La longitud de estas columnas varía con la distancia al eje de rotación. No hay que olvidar que esta capa fluida tiene limitada su profundidad por la capa conductora, provista de una dinámica muy diferente a la de los chorros zonales. De este modo, la longitud de una columna próxima al eje de rotación se verá limitada por una zona de transición, donde el fluido se torna conductor debido a las condiciones planetarias de presión y temperatura.

Si consideramos una columna de fluido de volumen constante, una variación en su longitud hará que se estire o se comprima. Ello da lugar al fenómeno conocido como «efecto del patinador». Una columna comprimida se ensancha y, con ello, comienza a girar más despacio por conservación del momento angular: lo mismo que ocurre con un patinador que, al girar sobre sí mismo, extiende los brazos. Por el contrario, una columna estirada rotará más deprisa, como sucede cuando nuestro patinador pega los brazos al cuerpo. Dado que la longitud de una columna varía en función de la distancia al eje, su efecto sobre la velocidad de los remolinos resulta análogo a una variación de la vorticidad con la latitud, al igual que en el modelo de capa delgada. Así pues, el modelo profundo también explica la formación de ondas de Rossby y, finalmente, la de chorros zonales.

Sin embargo, si bien ambos modelos coinciden en que dan cuenta de la dinámica casi bidimensional del fluido y del concepto de cascada inversa, se diferencian por la profundidad de los chorros. Aunque el modelo de capa delgada, inspirado en la dinámica atmosférica de la Tierra, ha sido históricamente el más difundido, a finales de 2016 los primeros datos de *Juno* indicaron

que las estructuras coherentes se hundirían varios cientos de kilómetros bajo la capa nubosa. Así pues, las bandas parecen ser más profundas de lo que pensábamos, lo que ha reavivado el debate sobre el modelo más apropiado para explicar su origen.

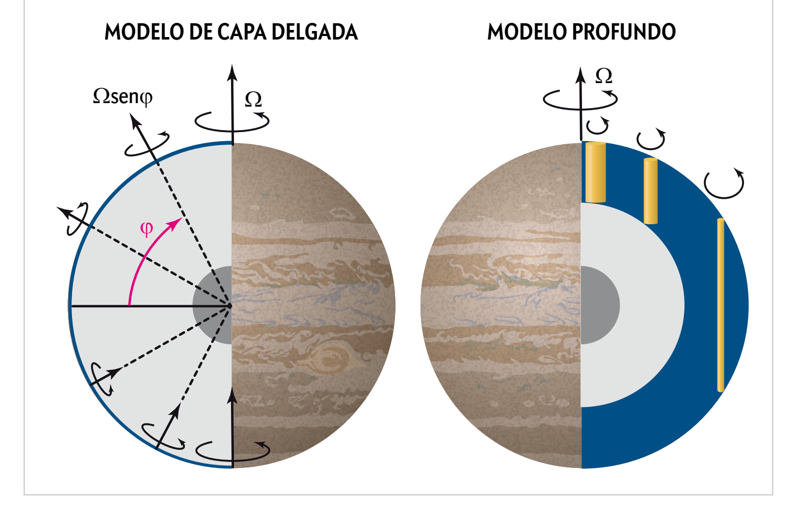
TEORÍA

Dos modelos para Júpiter

En principio, las bandas zonales de la atmósfera joviana solo pueden formarse en una geometría bidimensional. Para explicar su génesis se han propuesto dos modelos.

El modelo de capa delgada (*izquierda*) postula que el estrato superior de la atmósfera de Júpiter (*azul*), de unos cien kilómetros de espesor, no interacciona con las capas inferiores. Por tanto, su extensión lateral, de decenas de miles de kilómetros, permitiría despreciar la dimensión radial. La rotación del planeta (Ω) induce una fuerza de Coriolis que hace que el fluido de esta capa rote. Dicha fuerza depende de la latitud (φ), siendo máxima en los polos y mínima en el ecuador. La variación de la vorticidad (intensidad de la rotación) con la latitud causa una inyección de energía preferentemente en la dirección este-oeste, lo que generaría los chorros zonales.

El modelo profundo (*derecha*) considera una capa superior más espesa (*azul*). La rápida rotación de Júpiter hace que la fuerza de Coriolis prevalezca sobre todas las demás. El fluido se organiza en columnas (*amarillo*) alineadas con el eje del planeta y en las que la rotación impide el movimiento del fluido a lo largo del eje. La dinámica efectiva tiene así lugar en el plano perpendicular al eje de rotación del planeta. La velocidad de rotación del fluido en cada columna depende de la longitud de esta; si se considera un volumen constante, las columnas más alargadas rotarán con mayor rapidez, al igual que un patinador que, al girar, pega los brazos al cuerpo. La vorticidad depende por tanto de la latitud, lo que también conduce a la formación de chorros zonales.



SIMULACIONES

Para discriminar entre el modelo de capa delgada y el profundo, los investigadores comparan las observaciones del gigante gaseoso con los resultados de simulaciones por ordenador. Al mismo tiempo, también se desarrollan experimentos de laboratorio que aspiran a reproducir las condiciones planetarias deseadas.

El inconveniente de las simulaciones numéricas reside en que consumen un gran tiempo de cálculo. Aunque se emplee un superordenador, resulta imposible simular siquiera durante unos segundos la dinámica completa de Júpiter. Una solución consiste en simplificar el problema. En particular, el tiempo de cómputo depende en gran medida de la resolución espacial de la simulación. Pero, como mencionábamos antes, la formación de bandas a gran escala se debe al comportamiento del fluido a escalas menores, por lo que, si la resolución peca de escasa, corremos el riesgo de dejar de lado el fenómeno que pretendemos estudiar. Por el contrario, si la resolución es excesiva, el tiempo de cálculo será prohibitivo.

El modelo de capa delgada resulta muy ventajoso desde este punto de vista, ya que permite despreciar la componente vertical del movimiento del fluido y el cálculo se hace únicamente a lo largo de la superficie esférica del planeta. Pero, si bien este modelo consume poco tiempo, no acaba de concordar con las observaciones: las bandas reproducen de manera correcta lo que sucede en las latitudes altas, pero los desplazamientos este-oeste del ecuador se convierten de forma casi rutinaria en avances en el sentido contrario, lo que cuestiona la fiabilidad del modelo.

Por su parte, el modelo profundo debe tener en cuenta todo el volumen del fluido no conductor. La cuestión de la resolución se torna entonces crítica, sobre todo en la región de la «capa límite»: la estrecha zona en la que el flujo pasa de una velocidad máxima, la de los chorros, a una muy reducida o casi nula en el fondo de la capa planetaria. Este salto obligado de velocidad se agudiza si la rotación del planeta es elevada y la viscosidad baja. Por tanto, si se impone una velocidad de rotación realista, y si deseamos conservar un tiempo razonable de cálculo, hemos de aumentar la viscosidad del fluido. Por lo general, esta se eleva hasta hacerla equiparable a la de la miel, muy superior a la de un océano de hidrógeno. Aunque esa hiperviscosidad tiende a suprimir los chorros zonales en las regiones polares, este modelo presenta la ventaja de que logra reproducir de forma correcta las observaciones ecuatoriales.

JÚPITER EN UN *JACUZZI*

Por su parte, los estudios en el laboratorio reproducen la física de los flujos naturales sin necesidad de hacer hipótesis simplificadoras. Sin embargo, deben hacer frente a geometrías menos realistas. Una geometría esférica con la gravedad dirigida hacia el centro de la esfera requeriría eliminar el campo gravitatorio terrestre; por ello, los modelos más comunes son aquellos que imitan la envoltura planetaria con un volumen cilíndrico de agua sometido a una rotación elevada. Bajo tales condiciones, la superficie libre del líquido adopta la forma de un paraboloide de revolución, donde la altura del agua es escasa en el centro y máxima en el borde, lo que reproduce la curvatura a gran escala de la superficie fluida del planeta. Este modelo se ha probado en numerosas ocasiones en el laboratorio, pero, debido a las pequeñas profundidades del agua y a velocidades de rotación demasiado lentas, el esperado flujo zonal y de bandas múltiples nunca se había obtenido de manera convincente.

Hace poco, nuestro equipo ideó el primer dispositivo capaz de reproducir la dinámica de una capa planetaria profunda. Para ello, usamos un *jacuzzi* de 400 litros de agua a 75 revoluciones

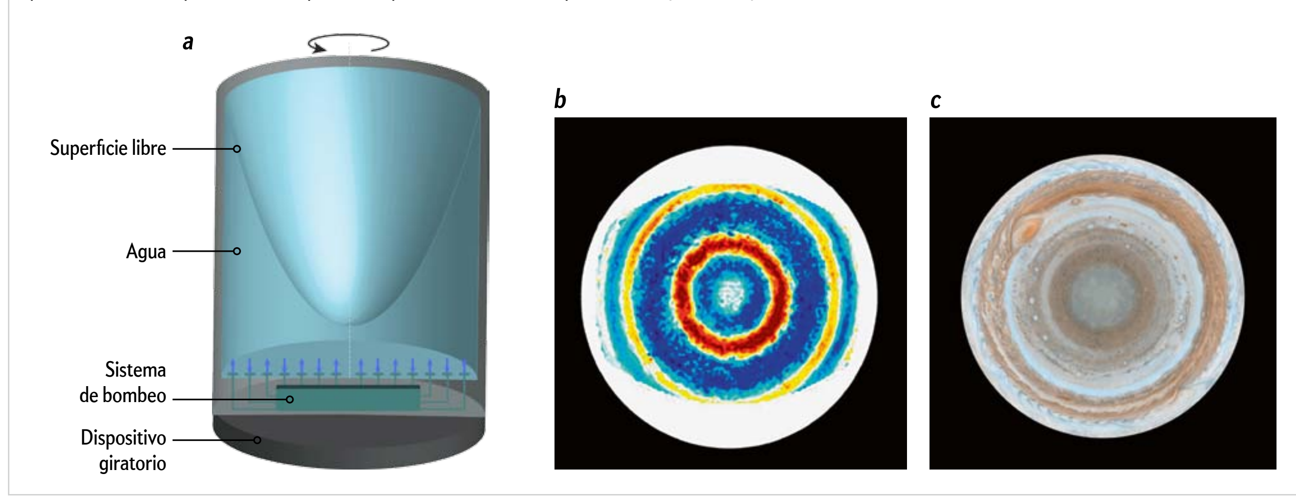
Un planeta en el laboratorio

Los experimentos pueden ayudar a discernir entre los distintos modelos de la atmósfera joviana. Aunque en el laboratorio resulta muy difícil reproducir una atmósfera planetaria con una fuerza de gravedad orientada hacia el centro de la esfera, las condiciones para la formación de chorros zonales pueden remediarse con ayuda de una superficie cilíndrica.

El dispositivo mostrado aquí, diseñado en el Instituto para la Investigación de Fenómenos Fuera del Equilibrio (IRPHÉ), en Marsella, consta de un depósito cilíndrico de un metro de diámetro, con 400 litros de agua en su interior y cuyo eje coincide con el de una mesa giratoria sobre la cual reposa (*a*). El agua fluye en un circuito acotado por pequeños agujeros en la base del depósito, como en un *jacuzzi*. Esta inyección de energía a pequeña escala imita las fuentes de calor interno y externo del planeta gigante.

Una vez que el recipiente comienza a rotar a 75 revoluciones por minuto, la superficie del líquido adopta la forma de un paraboloide de revolución; cuando eso ocurre, observarla desde arriba equivale a estudiar Júpiter desde uno de sus polos. La altura del fluido aumenta desde el centro (el polo de Júpiter) hacia el borde (latitudes bajas). El experimento reproduce las condiciones del modelo profundo: un sistema en rápida rotación adquiere una dinámica casi bidimensional, lo que permite la formación de grandes estructuras por cascada inversa. Las anisotropías en la superficie del líquido conducen a la formación de chorros zonales.

Gracias a la relativa profundidad del agua (20 centímetros en el centro y 90 en los bordes) y a una elevada velocidad de rotación, los autores han conseguido imitar las condiciones de los regímenes planetarios turbulentos. En concreto, observaron la formación de seis chorros zonales (*b, los colores indican la velocidad de rotación del fluido con respecto a la del depósito*) equiparables a los que presentaba Júpiter cuando fue observado desde el polo sur por la sonda *Cassini* (*c*).



por minuto. En este régimen extremo la rotación refuerza los movimientos en la dirección del eje, lo que provoca el fenómeno de cascada inversa descrito por el modelo profundo. En nuestro trabajo observamos la aparición espontánea de chorros zonales muy energéticos que formaban seis bandas muy distintas. Al contrario de lo que ocurría con las simulaciones numéricas, las bandas próximas al polo de nuestro «planeta» mostraban propiedades similares a las observadas en Júpiter. Este experimento refuta así las críticas lanzadas hasta ahora contra el modelo profundo, al tiempo que ofrece el primer modelo de laboratorio capaz de reproducir de manera convincente las propiedades de los vientos en los planetas gigantes.

Si bien estos resultados parecen decantarse por el modelo profundo, la respuesta no es aún definitiva. Los físicos deberán afinar sus modelos para tener en cuenta otros fenómenos que también podrían influir en la dinámica atmosférica, como el posible papel del campo magnético joviano sobre la disipación de la energía turbulenta.

Tras los primeros resultados de *Juno*, esperamos con impaciencia los siguientes. En un principio la sonda debía sobrevolar 32 veces el planeta gigante, pero el peligro de una avería detectada en un motor ha obligado a la NASA a revisar sus planes. *Juno* sobrevolará Júpiter 12 veces más de aquí al final de su misión, el próximo junio. Los datos que recabe serán menos numerosos de lo previsto, pero, a pesar de todo, deberían ayudar a resolver el enigma de las bandas zonales del planeta. IyC

PARA SABER MÁS

The morphogenesis of bands and zonal winds in the atmospheres on the giant outer planets. James Y.-K. Cho y Lorenzo M. Polvani en *Science*, vol. 273, págs. 335-337, julio de 1996.

Simulation of equatorial and high-latitude jets on Jupiter in a deep convection model. Moritz Heimpel et al. en *Nature*, vol. 438, págs. 193-196, noviembre de 2005.

A laboratory model for deep-seated jets on the gas giants. Simon Cabanes et al. en *Nature Physics*, vol. 13, págs. 387-390, abril de 2017.

Jupiter's interior and deep atmosphere: The initial pole-to-pole passes with the *Juno* spacecraft. Scott J. Bolton et al. en *Science*, vol. 356, págs. 821-825, mayo de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

La Gran Mancha Roja de Júpiter. Agustín Sánchez Lavega en *IyC*, septiembre de 1990.

La cosecha de la misión Galileo. Torrence V. Johnson en *IyC*, abril de 2000.

***Juno* sobre Júpiter.** Tilmann Althaus, *en este mismo número*.

por Alejandro Pérez Carballo

Alejandro Pérez Carballo es profesor de filosofía en la Universidad de Massachusetts en Amherst.



Condicionales contrafácticos

¿Cuándo podemos tomar por ciertos los enunciados con premisas hipotéticas?

Un amigo acaba de lanzar una moneda al aire. Antes de mirar el resultado, le propone lo siguiente: si la moneda cayó cara, usted ganará 100 euros; en caso contrario, deberá pagar 101. Sensatamente, usted decide rechazar la apuesta. Acto seguido le muestra la moneda y ambos comprueban que cayó cara. Él sonríe y le dice:

(1) Si hubieses aceptado la apuesta, habrías ganado 100 euros.

Semejante enunciado parece ser verdadero. Es probable que, al menos por un instante, usted se arrepienta de no haber aceptado. Y cabe pensar que ese arrepentimiento surge de la convicción de que, en caso de haberlo hecho, ahora tendría 100 euros más en el bolsillo.

Los condicionales cuyo antecedente se expresa en forma de subjuntivo se comportan de manera muy distinta de los condicionales corrientes. Sabemos, por ejemplo, que el siguiente enunciado es verdadero:

(2) Si Cervantes no escribió *Don Quijote*, otra persona lo escribió.

Pero, al mismo tiempo, creemos que este es falso:

(3) Si Cervantes no hubiese escrito *Don Quijote*, otra persona lo habría escrito.

Una pregunta que cuenta con cierta tradición en lógica es bajo qué condiciones pueden considerarse verdaderos los enunciados del estilo de (3). Como veremos a continuación, analizar las posibles respuestas nos obligará a repensar algunas nociones básicas, como la de causalidad.

Mundos hipotéticos

Usemos el símbolo $\Box\!\!\rightarrow$ para representar los condicionales de este tipo. Escribiremos

$$A \Box\!\!\rightarrow B$$

para abreviar los enunciados de la forma «Si *A* hubiese sido verdadero, *B* sería verdadero».

En lo que sigue, consideraremos solo aquellos enunciados en los que *A* sea falso. Les llamaremos, por ende, condicionales «contrafácticos», puesto que parten de una premisa que es contraria a los hechos. La pregunta que queremos responder es: ¿cuáles son las condiciones de verdad de un enunciado de la forma $A \Box\!\!\rightarrow B$?

Una hipótesis bastante sencilla es la siguiente: $A \Box\!\!\rightarrow B$ es verdadero si y solo si *B* es una consecuencia lógica de *A*. Ello explicaría por qué (3) es falso, ya que «Alguien (aparte de Cervantes) escribió *Don Quijote*» no constituye una consecuencia lógica de «Cervantes no escribió *Don Quijote*». En efecto, podría ocurrir que nadie hubiese escrito jamás el *Quijote*, en cuyo caso «Cervantes no escribió *Don Quijote*» sería verdadero, pero «Alguien (aparte de Cervantes) escribió *Don Quijote*» sería falso.

Por desgracia, nuestra hipótesis no puede ser correcta. A fin de cuentas, el enunciado (1) («Si hubieses aceptado la apuesta, habrías ganado 100 euros») es verdadero, pero «Usted gana 100 euros» no constituye una consecuencia lógica de «Usted acepta la apuesta».

Pero, aunque errónea, puede que nuestra hipótesis inicial apunte en la dirección correcta. Por supuesto, «Usted gana 100 euros» no es una consecuencia lógica de «Usted acepta la apuesta» solamente. Sin embargo, sí lo es de una serie de enunciados que describen la situación, como «La apuesta consiste en que recibirá 100 euros si la moneda cae cara», «Usted acepta la apuesta», «La moneda se lanzó» y «La moneda cayó cara». Dicho de otro modo: hay un conjunto G_V de enunciados tal que «Usted gana 100 euros» constituye una consecuencia lógica de G_V y de «Usted acepta la apuesta».

Ahora bien, para que $A \Box\!\!\rightarrow B$ sea verdadero, no basta con que haya un conjunto cualquiera de enunciados *G* tal que *B* sea una consecuencia lógica de $G + A$. De lo contrario, nuestro enunciado (3) sería verdadero. Para ver por qué, supongamos que G_F es el conjunto formado por el enunciado «Lope de Vega escribió *Don Quijote*». En tal caso, queda claro que «Alguien que no era Cervantes escribió *Don Quijote*» es una consecuencia lógica de «Cervantes no escribió *Don Quijote*» y «Lope de Vega escribió *Don Quijote*». De modo que, si para que $A \Box\!\!\rightarrow B$ fuese verdadero, bastase la existencia de un conjunto de enunciados *G* tales que *B* fuese una consecuencia lógica de $G + A$, tendríamos que el enunciado «Si Cervantes no hubiese escrito *Don Quijote*, otra persona lo habría escrito» sería verdadero.

Pero hay una diferencia importante entre G_V y G_F: G_V solo contiene enunciados verdaderos, mientras que G_F contiene un enunciado falso. La siguiente modificación parece entonces bastante natural: un enunciado de la forma $A \Box\!\!\rightarrow B$ es verdadero si y solo si hay un conjunto G_V de enunciados verdaderos tales que *B* es una consecuencia lógica de $G_V + A$.

Por desgracia, nuestra nueva hipótesis tampoco puede ser correcta. El enunciado «Alguien escribió *Don Quijote*» es verdadero. Y este enunciado, junto a «Cervantes no escribió *Don Quijote*», tiene como consecuencia lógica «Alguien que no es Cervantes escribió *Don Quijote*». ¡Pero esto no quiere decir que (3) sea cierto!

¿Cuándo ocurrió?

Los enunciados de G_V relativos al ejemplo (1) («La apuesta consiste en que recibirá 100 euros si la moneda cae cara», «La moneda se lanzó» y «La moneda cayó cara») son verdaderos. Pero observemos, además, que cada uno de ellos describe sucesos que tuvieron lugar antes de que usted rechazara la apuesta. En cambio, si bien «Alguien escribió *Don Quijote*» es verdadero, este enunciado no se refiere a nada que sucediese antes de que Cervantes escribiera el *Quijote*. La diferencia entre (1) y (3) parece guardar relación con el hecho de que, si bien es cierto que en ambos casos hay un conjunto de enunciados verdaderos tales que el consecuente del contrafáctico aparece como una consecuencia lógica de dichos

enunciados más el antecedente, solo en (1) tenemos enunciados que corresponden a sucesos previos a la negación del antecedente.

Así que podemos formular una nueva hipótesis: un enunciado de la forma $A \mathrel{\square\!\!\rightarrow} B$ es cierto si y solo si hay un conjunto G_A de enunciados verdaderos y que describen eventos anteriores a $\neg A$ (la negación de A) tales que B sea una consecuencia lógica de $G_A + A$.

Esta hipótesis proporciona el resultado correcto para cada uno de los casos que hemos considerado hasta ahora. Pero necesitamos revisarla una vez más. Supongamos que tropieza cerca de una piscina. Por fortuna, un amigo llega a tiempo y evita que caiga en el agua. Podríamos decir que

(4) Si su amigo no hubiese llegado a tiempo, ahora estaría dentro de la piscina.

En este caso, sin embargo, los enunciados sobre acontecimientos previos al momento en que apareció su amigo no bastan para garantizar, junto con «Su amigo no llegó a tiempo», la verdad de «Usted está dentro de la piscina». Si la fuerza de la gravedad operase de otra manera, tal vez usted no habría acabado en la piscina aunque hubiese tropezado exactamente de la misma forma. Para obtener un conjunto de enunciados G tal que «Usted está dentro de la piscina» constituya una consecuencia lógica de G y de «Su amigo no llegó a tiempo», debemos incluir no solo enunciados sobre sucesos particulares que ocurren antes de que aparezca su amigo («Usted tropezó», «Se encontraba a 30 centímetros del borde de la piscina», etcétera), sino también las leyes de la naturaleza.

Nuestra hipótesis, finalmente, podría ser la siguiente: un enunciado de la forma $A \mathrel{\square\!\!\rightarrow} B$ es verdadero si y solo si hay un conjunto G_A de enunciados verdaderos que describen eventos anteriores a $\neg A$ y tales que $G_A + A$, junto con los enunciados correspondientes a las leyes de la naturaleza, tienen a B como consecuencia lógica.

¿Victoria?

Imaginemos que debe tomar un vuelo a Londres. Pero, en vez de ir en tren al aeropuerto, se decide por un taxi. No obstante, hay un accidente en la autopista y el tráfico es tan pesado que no logra llegar a tiempo. Mientras espera en el atasco y ve pasar la hora de su vuelo, se dice:



SI EN LUGAR DE IR AL AEROPUERTO en taxi hubiera ido en tren, ¿habría llegado a tiempo para mi vuelo?

(5) Si hubiese tomado el tren, ya estaría volando a Londres.

Consideremos el conjunto de enunciados compuesto por las leyes de la naturaleza más los enunciados verdaderos que describen acontecimientos previos a su decisión de no tomar el tren. Su verdad tampoco basta para garantizar su llegada a tiempo al aeropuerto: necesitamos, además, un enunciado que establezca que no hubo interrupciones en el servicio de trenes. Y dicho enunciado, si bien verdadero, describe un evento posterior a su decisión de tomar un taxi.

Podríamos intentar lo siguiente: reemplazar la condición de que G_A describa enunciados previos a $\neg A$ por la de que se trate de enunciados cuya verdad no depende de la verdad de $\neg A$. Así pues, tendríamos que $A \mathrel{\square\!\!\rightarrow} B$ es verdadero si y solo si hay un conjunto G_A de enunciados verdaderos y cuya verdad no depende de la de $\neg A$ tales que $G_A + A$, junto con las leyes de la naturaleza, tienen a B como consecuencia lógica. (Nótense las consecuencias de esta regla para el enunciado (3): «Alguien escribió *Don Quijote*» es verdadero porque «Cervantes escribió *Don Quijote*» lo es; sin la restricción a enunciados cuya verdad no dependa de la falsedad del antecedente, el enunciado «Si Cervantes no hubiese escrito *Don Quijote*, alguien más lo habría hecho» sería verdadero.)

La restricción a enunciados cuya verdad no dependa de la de $\neg A$ nos permite considerar enunciados sobre lo que sucedió antes que $\neg A$ (ya que podemos suponer que nada de lo que precede a $\neg A$ depende de la verdad de $\neg A$). Sin embargo, también nos permite considerar algunos enunciados sobre lo que sucedió después de $\neg A$. Así que nuestra nueva hipótesis es más permisiva que la anterior: (5), por ejemplo, es verdadero según esta nueva hipótesis (la verdad de «No hay interrupciones en el servicio de trenes» no depende de la verdad de «Usted toma un taxi»), pero no según la anterior.

Ahora bien, ¿qué queremos decir con que la verdad de un enunciado dependa de la de otro? En el ejemplo de Cervantes, «Alguien escribió *Don Quijote*» constituye una consecuencia lógica de «Cervantes escribió *Don Quijote*». Pero este no es el único tipo de dependencia posible. Supongamos que su amigo le propone el mismo juego que antes: ganará 100 euros si la moneda cae cara y perderá 101 si sale cruz. Al igual que entonces, usted rechaza la apuesta. Ahora su amigo saca del bolsillo una moneda con dos caras y la lanza. Por supuesto, el resultado es una cara. Su amigo sonríe y le dice de nuevo:

(6) Si hubieses aceptado la apuesta, habrías ganado 100 euros.

Ahora este enunciado es falso. Si permitimos conjuntos de enunciados G_A que incluyan «Su amigo lanza una moneda de dos caras», podemos construir uno que, sumado a las leyes de la naturaleza, implique como consecuencia lógica «Usted gana 100 euros». Sin embargo, la verdad de «Su amigo lanza una moneda de dos caras» depende de su decisión de no haber aceptado la apuesta: fue eso lo que le llevó a lanzar una moneda trucada en lugar de una corriente. Pero, en este caso, la relación de dependencia no es lógica, puesto que «Su amigo lanza una moneda de dos caras» no constituye una consecuencia lógica de «Usted no acepta la apuesta».

El problema es que parece casi irresistible concluir lo siguiente: la verdad de un enunciado E (en este caso, «Su amigo lanza una moneda de dos caras») depende de la de $\neg A$ («Usted no acepta la apuesta») si y solo si, si A fuese verdadero, E sería falso. Y esto, en combinación con nuestra última hipótesis, nos dice lo siguiente: un enunciado $A \mathbin{\Box\!\!\rightarrow} B$ es verdadero si y solo si existe un conjunto de enunciados G_A tales que, para todo E en G_A, el enunciado $A \mathbin{\Box\!\!\rightarrow} \neg E$ no es verdadero, y tales que $G_A + A$, junto con los enunciados de las leyes de la naturaleza, tienen a B como consecuencia lógica. Pero si bien esta hipótesis podría ser la correcta, adolece de un problema nada trivial: no nos permite explicar a alguien cómo emplear los condicionales contrafácticos, pues ofrece condiciones de verdad en términos de otros contrafácticos.

Por último, tal vez haya una manera de escapar a este círculo. Quizá valga la pena explorar la hipótesis siguiente: la verdad de E («Su amigo lanza una moneda de dos caras») depende de la de $\neg A$ («Usted no acepta la apuesta») si y solo si $\neg A$ forma parte de la causa de la verdad de E (o si E es una consecuencia lógica de $\neg A$). Pero, para dar esto por bueno, hemos de tomar muy en serio la noción de causalidad. En el pasado, varios filósofos han intentado analizar la idea de causa en términos de condicionales contrafácticos. Pero, si nuestra hipótesis final es la correcta, hay que abandonar esa tradición y, en su lugar, tomar como básica la noción de causa. Y ello implica dejar de lado la sospecha, asociada al gran Bertrand Russell, de que la idea de causa «es una reliquia de una época pasada que sobrevive, como la monarquía, porque se supone erróneamente que no hace ningún daño». IyC

PARA SABER MÁS

Una de las discusiones clave sobre el análisis de los condicionales contrafácticos aparece en **Fact, fiction, and forecast**, de Nelson Goodman (Harvard University Press, 1955). Una tradición muy importante al respecto —en términos de mundos posibles y relaciones de similitud entre ellos— comienza con Robert Stalnaker en **A theory of conditionals** (*Studies in Logical Theory*, American Philosophical Quarterly Monograph Series n.º 2, págs. 98-112; Blackwell, 1968) y David Lewis en **Counterfactuals** (Blackwell, 1973). Una de las teorías matemáticas más complejas para afrontar el problema de las relaciones causales surge en la obra de Judea Pearl (por ejemplo, **Causality**, segunda edición; Cambridge University Press, 2009), así como en la de Clark Glymour y su equipo de Carnegie Mellon (**Causation, prediction and search**, segunda edición, MIT Press, 2001).

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Cómo entender los condicionales? Alejandro Pérez Carballo en *IyC*, noviembre de 2013.

Condicionales y probabilidades. Alejandro Pérez Carballo en *IyC*, junio de 2015.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik



Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.

La maravillosa lengua del camaleón

Este sorprendente animal atrapa sus presas en un abrir y cerrar de ojos gracias a dos fenómenos: el almacenamiento de energía elástica y la adherencia viscosa

Proyectar una lengua casi dos veces más larga que el propio cuerpo en 0,04 segundos, asir firmemente una presa cuya masa puede ser un tercio de la propia y llevársela a la boca en medio segundo: tal es la proeza del camaleón. El fenómeno no ha dejado impasibles a los investigadores, quienes poco a poco han comenzado a entender los mecanismos que intervienen en el proceso.

Todo parte de una paradoja anatómica. Para alcanzar una velocidad de unos 6 metros por segundo, el extremo de la lengua del camaleón debe soportar una aceleración unas 50 veces mayor que la de la gravedad. La potencia requerida es de 3 vatios por gramo de músculo empleado, mucho mayor que la desplegada por el resto de los vertebrados. Hace falta, pues, un mecanismo más sutil que una simple contracción muscular. ¿Cómo lograrlo?

Catapulta telescópica

En 2004, investigadores de las universidades neerlandesas de Leiden y Wageningen sugirieron que la lengua del camaleón se comporta como una catapulta, en la que la energía se va almacenando de manera progresiva antes de ser liberada con rapidez.

La primera particularidad de este animal es que su lengua está constituida por tejidos blandos soportados por una estructura ósea articulada. Antes de proyectar la lengua, esa estructura hace salir por la boca el «proceso entogloso»: un hueso del tamaño de una cerilla sobre el cual la lengua encaja como un calcetín. La lengua misma es un órgano complejo. Su extremo incluye una serie de vainas encajadas, compuestas por fibras de colágeno y capaces de deslizarse unas con respecto a las otras para desplegarse de modo telescópico. Dichas vainas se encuentran revestidas por el músculo acelerador y están unidas a otro, el retractor, situado por detrás y también encajado sobre el hueso (*véase la figura de la página contigua*).

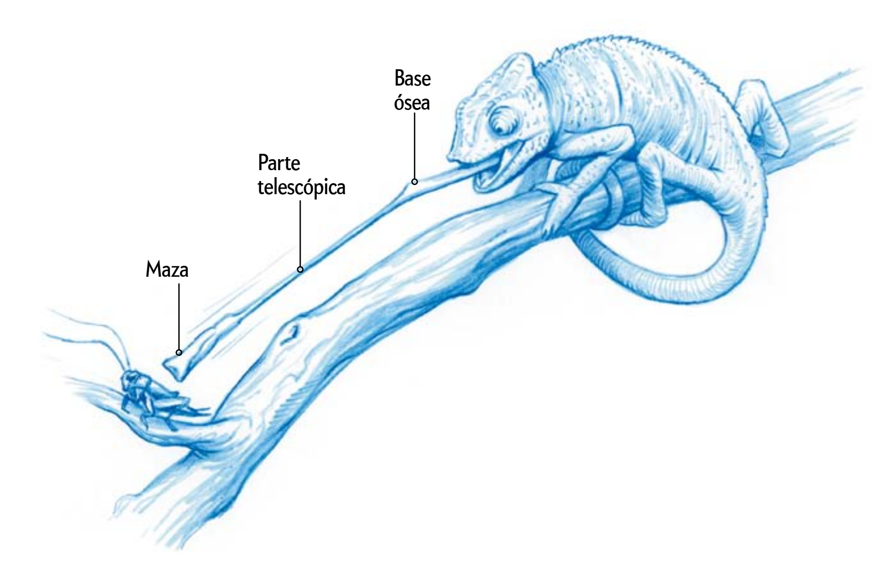
¿Qué ocurre cuando el músculo acelerador se estrecha y se comprime contra el hueso? Dado que el retractor le impide deslizarse hacia atrás, se alarga y su borde se aproxima al ápice del hueso, en la punta de la lengua. Al hacerlo, arrastra consigo las vainas de colágeno y las tensa, lo que convierte la contracción del músculo en energía elástica de las fibras. Cuando el alargamiento llega a la punta del entogloso, los tejidos de colágeno empiezan a deslizarse por encima y, en ausencia del hueso central, se distienden en la dirección radial. Es en este momento en el que la energía elástica se convierte en cinética.

En el extremo afilado y cónico del hueso, esa distensión repentina crea un empuje longitudinal, responsable de la aceleración de los tejidos de la lengua. Esta es entonces lanzada hacia adelante y el acordeón del músculo retractor, totalmente relajado, se despliega por completo. La aceleración de la lengua es tal que la gravedad puede despreciarse: el órgano se extiende en línea recta hasta llegar a su presa sin que esta se percate de lo que sucede.

Una lengua pegajosa

Pero alcanzar la presa no lo es todo; además, hay que llevársela a la boca. ¿Cómo? Antes de accionar el músculo retractor, el camaleón debe sujetar bien el insecto con la punta de la lengua. Cuando el firme eje central del órgano llega al objeto, esa parte se detiene de inmediato, pero los tejidos blandos siguen adelante y envuelven parcialmente a la víctima. En ese momento, la superficie de contacto entre la lengua y la presa se hace máxima.

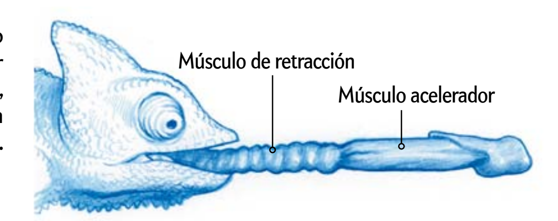
Sin embargo, ¿qué retiene a la víctima? Para ello existen varios mecanismos.

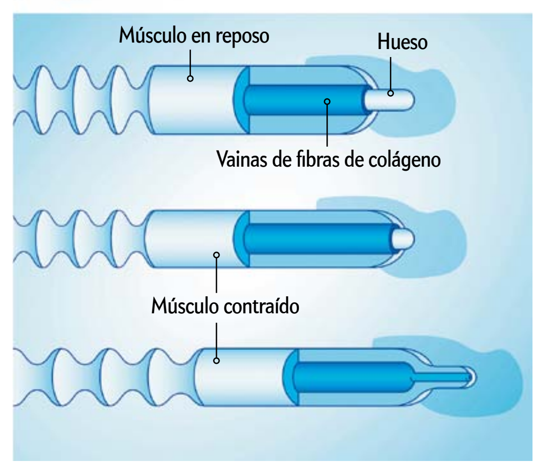


LA LENGUA DEL CAMALEÓN se proyecta a gran velocidad sobre la presa, cuya distancia el reptil ha calculado gracias a que puede orientar sus ojos de manera independiente. Anatómicamente compleja, la lengua se compone de una base ósea envuelta en tejidos blandos, formados por músculos y vainas telescópicas de colágeno.

BRUNO VACARO (*ilustraciones*)

LA PROYECCIÓN DE LA LENGUA comienza con la contracción del músculo acelerador en torno al eje óseo, lo que tensa las fibras de colágeno. Cuando, por efecto de la contracción, el conjunto se alarga hasta alcanzar el extremo del hueso, la energía elástica almacenada por las vainas de colágeno se libera de golpe en dirección del eje central, lo que las impulsa con gran fuerza hacia delante.





El primero consiste en un efecto de tipo velcro: la lengua se encuentra recubierta de papilas que le confieren rugosidad y que se acoplan a las irregularidades de la presa, con lo que la retracción las atrapa a modo de garfios.

El segundo se asemeja más bien a un efecto de ventosa. Cuando el animal lanza la lengua, la maza que la remata es convexa; sin embargo, se ha observado que durante el trayecto y justo antes del impacto, los músculos del centro de la lengua se retraen, de modo que la maza se torna cóncava y crea así una depresión. Para cuantificar la succión resultante, en el año 2000 un grupo de investigadores empleó un camaleón dormido, pero cuya lengua podía estimularse eléctricamente, a fin de medir la fuerza que esta ejercía sobre un pequeño tubo de cristal con el otro extremo abierto o cerrado. La fuerza resultó ser más intensa sobre el tubo cerrado (en cuyo interior la presión puede disminuir, como en una ventosa) que sobre el abierto (a presión atmosférica).

Con todo, la cuestión no acaba aquí. En 2016, otro equipo revisó al alza la importancia de un mecanismo más: la adherencia viscosa, llamada también adherencia de Stefan, en honor al físico esloveno que la identificó en 1824.

Imaginemos una película de agua entre dos placas que tratamos de separar tirando de ellas; por ejemplo, un objeto de base plana sobre una superficie mojada. Esa separación generará una circulación en el líquido que tenderá a hacer que el espacio intersticial siga lleno. El agua adquiere así una velocidad según la perpendicular a las placas, pero también en el plano paralelo a ellas. Dependiendo de la viscosidad del líquido (el rozamiento entre sus distintas capas en movimiento), aparecerá una resistencia a la tracción. Esta fuerza de adherencia viscosa resulta directamente proporcional a la viscosidad del líquido y a la velocidad de separación de las placas.

Volviendo al camaleón, la viscosidad de su saliva asciende a unos 4 poises: 400 veces más que la saliva humana. Para una película mucosa de 50 micrómetros de espesor y una superficie de contacto de 15 milímetros cuadrados, obtenemos fuerzas de unos 0,1 newtons (equivalente al peso de unos 10 gramos) para una velocidad de estiramiento del orden de un micrómetro por milésima de segundo.

Tales fuerzas son considerables, pero disminuyen con rapidez a medida que la película se estira. De hecho, cuanto mayor sea la masa de la presa, más intensa deberá ser la fuerza de adherencia y mayores las velocidades de estiramiento de la película. Pero ello implicará un aumento más drástico de su espesor y un descenso radical de la fuerza de adherencia. No en vano, un análisis detallado muestra que existe un tamaño límite de la presa más allá del cual la adherencia viscosa ya no permite atraparla. Dicho umbral se halla por encima del tamaño de las presas típicas del camaleón.

Por debajo de ese límite, ¿cómo acaba el almuerzo de nuestro amigo? Una vez relajado el resorte de la punta de la lengua, la fuerza de adherencia se desvanece, pero la presa ha adquirido suficiente velocidad para acompañar, gracias a su inercia, al repliegue en acordeón de la lengua. Entonces, a velocidad constante y en un abrir y cerrar de ojos, acaba en la boca de nuestro depredador. Buen provecho.

Mucosidad
Lengua
Presa

LA CAPTURA DE LA PRESA se debe a un efecto de succión ejercido por la legua, pero también, y sobre todo, al fenómeno de adherencia viscosa. La lengua del camaleón se halla recubierta de una sustancia de gran viscosidad. Al retraerse, la tracción ejercida sobre la mucosidad induce en ella un flujo que genera una resistencia a la tracción inicial y, por tanto, una fuerza adhesiva.

PARA SABER MÁS

Evidence for an elastic projection mechanism in the chameleon tongue. Jurriaan H. de Groot y Johan L. van Leeuwen en *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 271, págs. 761-770, abril de 2004.

Dynamics of prey prehension by chameleons through viscous adhesion. Fabian Brau et al. en *Nature Physics*, vol. 12, págs. 931-935, octubre de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

El secreto de la lengua de los camaleones. Katherine Harmon en *IyC*, septiembre de 2010.



¿POR QUÉ A LOS PATOS NO SE LES ENFRÍAN LOS PIES? LA FÍSICA DE LO COTIDIANO

Helen Czerski
Paidós, 2017

Asombro cotidiano

El día a día como atalaya para entender el universo

No es este exactamente un libro de ciencia recreativa, si bien busca el placer del conocimiento en las cosas comunes y que nos permiten generalizar el fenómeno observado a otros ámbitos menos domeñables. El principio del saber lo situaba la *Metafísica* de Aristóteles en la admiración. Seguía la estela de Platón en el *Teeteto*, para quien la admiración era un sentimiento propio del filósofo y el origen de la filosofía. El propio Descartes, en los albores de la ciencia moderna, compartía esa idea al incluir, en *Las pasiones del alma*, la admiración entre una de las seis pasiones fundamentales, definiéndola como la súbita sorpresa del alma que la lleva a considerar con atención los objetos que le parecen raros y extraordinarios.

No es otro el sentimiento que guía a Helen Czerski, profesora de física en el London College, en este libro. La fascinación de nuestra infancia por cuanto sucedía a nuestro alrededor, la de nuestros ingenuos experimentos en la cocina o en el jardín, revive en esta obra. Aquí, lógicamente, los planteamientos y las explicaciones son otros. Las observaciones más sencillas —por qué los patos mantienen calientes sus patas mientras deambulan sobre el hielo, por qué cuando se añade leche al té parece como si se formaran nimboestratos tormentosos— no solo hallan respuesta sistemática, sino que nos llevan a la universalidad de las regularidades que observamos en nuestro pequeño mundo familiar. Al darse lo mismo en nuestro laboratorio doméstico que en los confines del universo, nuestra vida diaria se erige en el mejor lugar a donde mirar si queremos llegar a conocer la realidad del mundo. Los secretos de la física se nos abren en nuestro entorno cotidiano. La autora muestra que, para entender el funcionamiento del universo, basta con prestar atención a las regularidades del día a día e imaginar modos, cada vez más refinados, de explicarlas.

El libro une, pues, en cañamazo de fondo, asuntos nimios (el aspecto rosáceo de la jalea de moras o el olor del aire previo a la lluvia) con cuestiones de alcance general. De lo familiar (manchas de café o botellas de kétchup) extrae conceptos para explicar los vientos de la Antártida, los tests médicos o futuras necesidades energéticas. Escondida en los objetos diarios y familiares se encuentra la ciencia que explica el cuerpo humano, el planeta Tierra y la forma en que procede la civilización. Somos una excepción en el mundo conocido. La luz que nos permite ver el espacio exterior constituye nuestro principal nexo de unión.

Los ejemplos escogidos continúan sorprendiéndonos. Tomemos la crepitación de las palomitas de maíz. Un grano seco de una mazorca contiene abundantes componentes nutricios (hidratos de carbono, proteínas, hierro y potasio) densamente empaquetados en el interior de la cáscara. Cada grano contiene un germen, el comienzo de una nueva planta, y un endospermo, que constituye el alimento de esta. El endospermo consta de almidón, almacenado en gránulos, y contiene un 14 por ciento de agua. Si echamos los granos en una sartén, el agua comenzará a evaporarse. A mayor temperatura las moléculas se mueven más deprisa, de modo que, a medida que se caliente cada grano, las moléculas del gas chocarán entre sí y con las paredes de la cáscara. Cuando la temperatura alcanza los 180 grados Celsius, la capa exterior se abre, independientemente del tamaño y forma del grano: la presión en el interior decuplica a la atmosférica a nivel del mar. Los granos explotan produciendo un sonido característico.

¿Por qué la tostada cae del lado de la mantequilla? La rotación de la tostada comienza justamente a la mitad de la caída de la mesa. La clave reside en que, en ese momento, la gravedad atrae a la tostada entera. La tostada puede dar media vuelta, pero le falta tiempo para dar una vuelta entera; interviene la fricción del aire. El poso de una taza de té abre una ventana al estudio de los terremotos. Reparando en las burbujas y en la baba del caracol, conoceremos algo mejor la mecánica de fluidos. Si nos fijamos en el comportamiento de la leche en una taza de té, observaremos una espiral de dos fluidos que circulan uno alrededor del otro y que constituye un caso maravilloso de pauta de remolinos.

Pero el caso más familiar de mecánica de fluidos nos lo ofrece el movimiento de un huevo. ¿Sabemos distinguir un huevo crudo de uno hervido sin quitarles la cáscara? Hay una forma sencilla de hacerlo. Pongamos el huevo crudo sobre una superficie lisa y dura y hagámoslo girar. Pasados unos segundos, paremos con un dedo sobre la cáscara la rotación del huevo. El huevo podría quedarse quieto. Pero, al cabo de uno o dos segundos, podría seguir girando. El huevo crudo y el hervido, vistos desde fuera, parecen lo mismo, pero por dentro son diferentes. Cuando paramos con el dedo el huevo hervido, detuvimos un cuerpo sólido. Pero cuando paramos el huevo crudo, detuvimos solo la cáscara; el líquido de su interior no cesó y, por ello, al cabo de un segundo o dos, siguió girando. El principio físico subyacente es el de conservación del momento angular. Además, el giro del huevo revela pistas para entender las galaxias espirales.

De la lectura se infiere una enseñanza animadora para las nuevas generaciones de científicos. En una época de teoría de cuerdas y multiversos, da la impresión de que la ciencia es coto privado de especialistas y estudiosos. Nada más erróneo. Vivimos en la frontera, en el límite entre el planeta Tierra y el resto del universo. En una noche clara podemos contemplar legiones de estrellas brillantes, familiares y permanentes, hitos únicos de nuestro lugar en el cosmos. Todas las civilizaciones humanas han observado las estrellas, pero ninguna las ha alcanzado. Nuestra morada aquí en la Tierra es todo lo contrario: revuelta, mutable, llena de novedades y de objetos que tocamos y con los que nos desenvolvemos en la vida diaria. Aquí abajo es donde hay que mirar si nos interesa saber cómo funciona el universo. El mundo físico se rige por los mismos principios y consta de los mismos átomos que se combinan de manera muy dispar para producir un rico repertorio de resultados. Pero esa diversidad no es aleatoria. Nuestro mundo abunda en regularidades.

Vertamos un poco de leche en la taza de té; démosle un rápido movimiento. Observaremos un remolino, una espiral de dos fluidos en circulación sin apenas rozarse. En la taza, la espiral dura escasos segundos antes de producirse la mezcla completa de los dos líquidos. Pero fue tiempo suficiente para percatarnos de que los líquidos siguen el comportamiento de un remolino para mezclarse, en vez de fundirse de forma instantánea. Ese mismo fenómeno podrá contemplarse en otros lugares por la misma razón. Si miramos la Tierra desde el espacio, veremos vórtices similares en las nubes, creados cuando el aire caliente y el aire frío rondan uno alrededor del otro, en vez de mezclarse directamente. A mayor abundamiento, pudiera creerse que una tormenta en rotación no tenga nada que ver con una taza de té, pero la semejanza es clamorosa. Y ello es una clave que apunta hacia una realidad más profunda. Se trata de una base sistemática de todas esas formaciones, descubierta y sometida a comprobación experimental en el curso de generaciones. Y en eso consiste la ciencia.

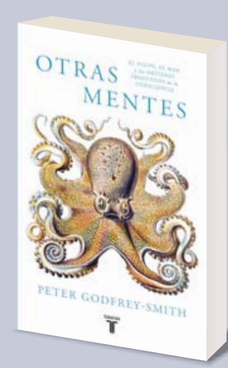
—Luis Alonso

NOVEDADES



¿CLONAR HUMANOS?
INGENIERÍA GENÉTICA Y FUTURO DE LA HUMANIDAD

Francisco J. Ayala
Alianza Editorial, 2017
ISBN: 978-84-9104-891-6
184 págs. (18 €)



OTRAS MENTES
EL PULPO, EL MAR Y LOS ORÍGENES PROFUNDOS DE LA CONSCIENCIA

Peter Godfrey-Smith
Taurus, 2017
ISBN: 9788430619078
320 págs. (21,90 €)



100 PREGUNTES DE QUÍMICA QUOTIDIANA

Claudi Mans
Cossetània Edicions, 2017
ISBN: 978-84-9034-649-5
208 págs. (14,70 €)



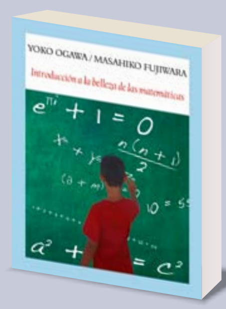
QUE VUELVA EL REY
LA NUEVA CIENCIA DE RESUCITAR ESPECIES

Helen Pilcher
Biblioteca Nueva, 2017
ISBN: 978-8416938735
376 págs. (17,95 €)



¿FUNCIONAN LAS VACUNAS?

Ignacio López-Goñi
y Oihana Iturbide
Next Door Publishers, 2017
ISBN: 978-84-946669-8-8
162 págs. (16,50 €)



INTRODUCCIÓN A LA BELLEZA DE LAS MATEMÁTICAS

Yoko Ogawa y Masahiko Fujiwara
Editorial Funambulista, 2017
ISBN: 978-84-947129-4-4
200 págs. (16 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

ENERO

1968 La debilidad de los sondeos

«Leo Bogart, presidente de la Asociación Estadounidense para la Investigación de la Opinión Pública, nos previene contra la tendencia a dispensar demasiado crédito a las encuestas de opinión, especialmente a las de temas políticos. "La respuesta 'No lo sé' a una pregunta del sondeo suele significar 'No quiero saberlo', que es otro modo de decir 'No quiero comprometerme'", escribe. En muchos casos, esa actitud refleja la percepción del encuestado de que el asunto no es de su responsabilidad. Bogart atribuye a los sondeos un papel valioso para comprobar la extensión de la ignorancia del público sobre la realidad de los hechos. "A menudo lo que deberíamos hacer es medir el grado de apatía, indecisión o conflicto por parte de la gran mayoría, y ver lo opinado como un producto residual."»



1968



1918



1868

1918 Los dioses de Egipto

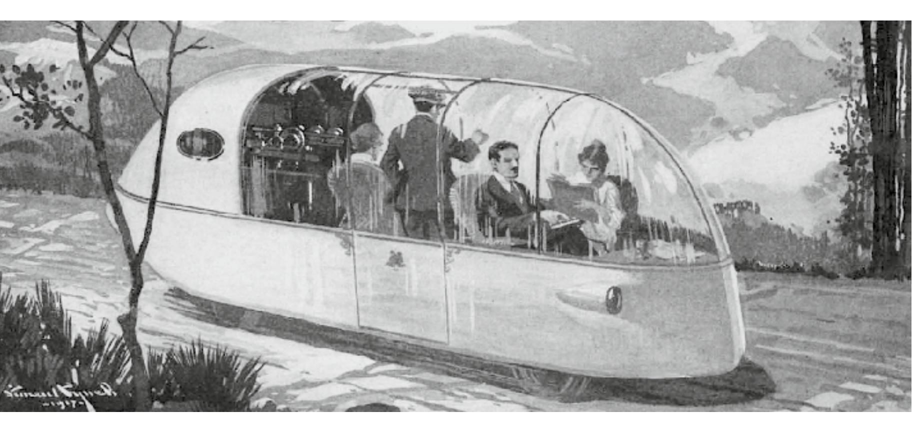
«Sigue en la oscuridad la cuestión de la naturaleza y el origen de los dioses locales egipcios; pero un artículo del profesor Flinders Petrie contribuye no poco a aclararla. Al ubicar las sedes de cada deidad llega a importantes conclusiones. Ra se presenta solo en una ciudad del sur, y su culto parece haber procedido del noreste. La distribución de Mut, la diosa madre, es claramente oriental, mientras que la de Amón es occidental. Set fue sin duda llevado a Egipto por la ruta del desierto, pues en él tuvo dos centros de alto rango, y fue introducido en el delta oriental a través del camino del mar Rojo. La distribución de la tríada osiriana revela un asentamiento en el país tan temprano que explica la difusión generalizada de su culto.»

El automóvil del futuro

«Es más o menos cierto que nadie sabe realmente nada acerca del porvenir. Así que, he ahí un intento. El auto del futuro será hermético a la intemperie, posiblemente todo de vidrio: laterales, frente, trasera y techo. Si alguna vez se fabrica vidrio maleable, puede que se prescinda del chasis. Pero hasta la fecha nadie ha descubierto tal material. El auto con volante de dirección será tan obsoleto como lo es hoy el auto con bomba manual de combustible o lubricante. La conducción se hará desde un pequeño cuadro de mandos que se apoyará en el regazo y estará conectado a la mecánica mediante cables eléctricos flexibles. El vehículo será guiado con una pequeña palanca de dedo, y no con un volante.»

Bistec de ballena

«Me he unido a la multitud en otro intento de lanzar un contraataque al alto coste de la vida. Permítanme decirles que, desde una perspectiva epicúrea, la carne de ballena no es tan horrible. Es mejor que la de cuervo, no tan dura como la de caimán, no tan hedionda como la de buitre. "Pues sí, cocínese con pimienta roja y buenas dosis de ajo y verán qué sorpresa." Esto será especialmente cierto si la pimienta es de la variedad mexicana, picante de veras. La Universidad de California y algunas instituciones más de mentes sabias atestiguan el valor del bistec de ballena como alimento, pero es su baratura, 26 centavos el kilo, su mejor baza.»



EL COCHE DEL FUTURO, conducido mediante una palanca de dedo, según se imaginaba en 1918.

1868 Matar al vector

«Despachos del capitán Chandler del vapor *Don* de EE.UU., datados en Veracruz el 16 de diciembre, informan de un brote de fiebre amarilla a bordo el 25 de noviembre. Se comprobó que era de un tipo sumamente maligno. El capitán hizo cerrar herméticamente las escotillas del sollado de literas y de la cámara de oficiales. Se desconectó una junta del calefactor de vapor del sollado y lo mismo se hizo en la cámara de oficiales. Tras dos horas de vaporización, un termómetro marcaba 76 °C en el primer recinto y 96 °C en el segundo. Después ya no hubo más casos de fiebre. El capitán Chandler está totalmente convencido de que el calor erradicó el morbo con la misma eficacia que lo habría hecho una helada extrema.»

Pasaron tres décadas hasta que se demostró definitivamente que la fiebre amarilla la transmitían los mosquitos.

Ruedas de caucho

«El señor R. W. Thompson, de Edimburgo, ha inventado una nueva locomotora para los caminos ordinarios y hace poco se ha puesto a prueba en aquella ciudad. Las cubiertas de las ruedas están hechas de bandas de caucho vulcanizado, de unos treinta centímetros de ancho y más de doce centímetros de grueso. Por increíble que parezca, esa sustancia blanda y elástica no solo soporta el gran peso del vehículo sin sufrir daño, sino que pasa sobre grava recién triturada y toda suerte de objetos agudos sin que quede ni una señal en el caucho. El destino de la máquina es Java.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXVIII, N.º 1; 5 DE ENERO DE 1918

LUGARES DE CULTO
NUEVA SERIE SOBRE ARQUEOLOGÍA

La universidad más antigua del mundo

Max Deeg

En los inicios de la Edad Media en India, Nalanda era un bastión de sabiduría. Con la desaparición del budismo en el siglo XIII cayó, sin embargo, en el olvido.



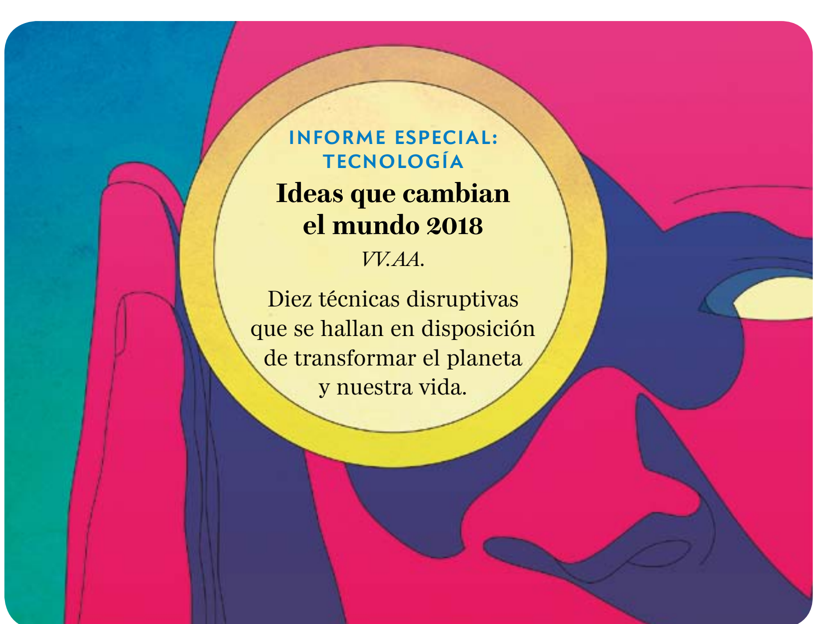
CLIMA

El enigma de las nubes

Kate Marvel

Los científicos comienzan a dilucidar si los cambios en la nubosidad acelerarán o frenarán el cambio climático.





INFORME ESPECIAL: TECNOLOGÍA

Ideas que cambian el mundo 2018

VV.AA.

Diez técnicas disruptivas que se hallan en disposición de transformar el planeta y nuestra vida.

MEDICINA TROPICAL

La enfermedad de Chagas, un reto global

Joaquim Gascon, Faustino Torrico y María Jesús Pinazo

Aunque endémica de América Latina, la dolencia ha llegado a Europa y otras partes del mundo. Ponerle freno exige mejorar el diagnóstico de las personas infectadas y favorecer su acceso al tratamiento.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros
El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Elisa Vilaret: *Apuntes*; Ana Mozo y Lorenzo Gallego: *Regeneración de la piel con células madre transgénicas*; Sara Arganda: *¿Es mensurable la consciencia?*; Fabio Teixidó: *Apuntes* y *Capturar inundaciones para combatir sequías*; Alberto Ramos: *Medir la belleza*; M.ª José Báguena Cervellera: *Cuando la anestesia transformó la cirugía*; Carlos Lorenzo: *Nuestro primo Neo*; Alfredo Marcos: *¿Qué significa estar sano o enfermo?*; Marián Beltrán: *Rescatemos los datos antiguos*; Andrés Martínez: *Apuntes* y *Evolución en las fronteras de la vida*; Blanca Álvarez: *La compleja fórmula de la pérdida de peso*; Javier Grande: *La química y la física, felizmente unidas* y *Juno sobre Júpiter*; Juan Pedro Adrados: *El enigma de las bandas de Júpiter*; J. Vilardell: *La maravillosa lengua del camaleón* y *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España